



TUGAS AKHIR - TL 141584

**ANALISA PENGARUH KOMPOSISI ELEKTRODA
TERHADAP MIKROSTRUKTUR DAN SIFAT MEKANIK
PADA PENGELASAN FCD600 DENGAN METODE SMAW**

Fakhrozi Ahmad Rizky

NRP 2712 100 078

Dosen Pembimbing
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



TUGAS AKHIR - TL 141584

**EFFECT ANALYSIS OF ELECTRODE'S COMPOSITION ON
MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF
FCD 600'S WELDING WITH SMAW METHOD**

Fakhrozi Ahmad Rizky

NRP 2712 100 078

Advisor

Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

**DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL
ENGINEERING**

Faculty of Industrial Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISA PENGARUH KOMPOSISI ELEKTRODA
TERHADAP MIKROSTRUKTUR DA SIFAT
MEKANIK PADA PENGELASAN FCD600 DENGAN
METODE SMAW**

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
FAKHROZI AHMAD RIZKY
NRP. 2712 100 078

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. (Pembimbing I)
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRAK

ANALISA PENGARUH KOMPOSISI ELEKTRODA TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK PADA PENGELASAN FCD 600 DENGAN METODE SMAW

Nama Mahasiswa : Fakhrozi Ahmad Rizky
NRP : 2712100078
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Wikan Jatimurti, S.T, M.Sc.

Terdapat pada crack Exhaust manifold pada bagian siku pipa dikarenakan adanya aliran turbulensi gas panas. Pengujian ini bertujuan untuk memperbaiki crack yang terjadi dengan metode pengelasan SMAW. Pengujian yang dilakukan adalah uji hardness, uji metalografi baik dengan mikroskop optic ataupun *scanning electrone microscope* (SEM). Nilai kekerasan pada material asli yang sudah digunakan 20.000 jam sebesar 194.04 HB, sementara pada material yang dilas dengan filler ENiFe-CI pada daerah Base sebesar 196.92, HAZ sebesar 255.6 dan Weld sebesar 195.12. Sedangkan material yang dilas dengan filler E309Mol-16 memiliki nilai kekerasan pada Base sebesar 198.54, HAZ sebesar 250.56 dan Weld sebesar 201.78. Hasil uji Metalografi pada Base fassa yang terbentuk pearlit dan ferrit, sedangkan daerah base pada kedua material yang dilas menunjukan fasa yang sama tetapi ada peningkatan pada ukuran fasa pearlite. Sedangkan HAZ pada kedua material sama-sama menunjukan adanya fasa baru yang terbentuk berupa Widmanstatten yang terlihat dari hasil SEM dan peningkatan luas area pearlite yang mengakibatkan adanya peningkatan pada nilai kekerasan. Pada weld metal dengan ENiFe-CI terlihat matriks berupa ferrit dengan grafit sedangkan pada E309Mol-16 matriks berupa Austenit dengan nilai kekeraan keduanya masih berada pada kisaran material asli

Kata Kunci: Pengelasan, SMAW, Exhaust Manifold, FCD 600

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRACT

EFFECT ANALYSIS OF ELECTRODE'S COMPOSITION MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF FCD 600'S WELDING WITH SMAW METHOD

Student's Name : Fakhrozi Ahmad Rizky
Student's Number : 2712100078
Departement : Teknik Material dan Metalurgi
Advisor : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.,
Wikan Jatimurti, S.T, M.Sc.

A crack occure at the elbow pipe of Exhaust manifold due to the turbulent flow of hot gas. To repairing the crack that occurring, author use SMAW welding methods. Tests conducted in this research is to test the hardness, metallographic test or scanning electrone microscope (SEM). From the hardness test, hardness value obtained on the original material that has been used 20,000 hours of HB 194.04, while the material is welded with filler ENiFe-CI in the Base area of 196.92, amounting to 255.6 and Weld HAZ of 195.12. While the material is welded with filler E309Mol-16 has a hardness value at the Base of 198.54, 250.56 and HAZ of Weld at 201.78. Metallographic test results, Base Fassa area formed pearlite and ferrite, while areas on the second base material being welded still show the same phase, but there is an increase in the size of the pearlite phase. As for the HAZ in both are showed a new phase that occur as Widmanstatten as shown in SEM result and an increase in the size of pearlite that cause increasing in the hardness value. HAZ that weld with EniFe-CI shown ferrite matriks with graffit and E309Mol-16 shown Austenite matriks the hardness value of both filler are still in range of original material's hardness.

Keyword: *Welding, SMAW Exhaust Manifold, FCD600*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Terima kasih atas rahmat dan berkah Allah SWT kepada saya, sehingga saya mampu menyelesaikan tugas akhir saya dan menyusun laporan tugas akhir saya yang berjudul: **ANALISA PENGARUH KOMPOSISI ELEKTRODA TERHADAP MIKROSTRUKTUR DA SIFAT MEKANIK PADA PENGELASAN FCD600 DENGAN METODE SMAW.**

Adapun laporan ini disusun dan diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan ini masih jauh dari kesempurnaan, Hal ini dikarenakan adanya keterbatasan kemampuan penulis dalam penyusunan laporan ini. Namun, penulis dapat mewujudkan laporan ini secara lengkap berkat adanya perhatian, bimbingan, dan petunjuk dari berbagai pihak. Dengan adanya kekurangan dan kesalahan dalam penulisan laporan ini. Untuk itu, saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan untuk menjadi evaluasi selanjutnya.

Demikian penulis berharap semoga laporan ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya khususnya bagi sesama mahasiswa yang menggeluti bidang pemodelan maupun pengolahan mineral.

Surabaya, juli 2016
Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II	5
II.1 Klasifikasi dan Metalurgi Dasar Besi Cor	5
II.1.1 Pengertian besi cor	5
II.1.2 Klasifikasi	7
II.2. Besi Cor Nodular	10
II.2.1 Mikrostruktur dan Fasa Pada Besi Cor Nodular	13
II.3 Besi Tuang Nodular JIS FCD 600	16
II.4 Exhaust Manifold	16

II.5 Definisi Pengelasan.....	17
II.6 Metalurgi Pengelasan.....	18
II.6.1 Parameter Pengelasan	20
II.7 Arc Welding.....	21
II.7.1 Shielded Metal Arc Welding	22
II.8 Heat Input	24
II.9 Filler Metal	25
II.10 Heat Treatment	27
II.10.1. Preheat	27
II.10.2 Post Heat	29
II.11 Sifat Mekanik Kekerasan.....	32
II.12 Metallography	33
II.12.1 Etsa.....	34
II.13 Scanning Electron Microscope	35
BAB III.....	37
III.1 Diagram Alir Percobaan	37
III.2 Rancangan Penelitian	38
III.3 Metode Penelitian.....	38
III.4 Bahan Penelitian.....	38
III.4.1 Material Uji	38
III.4.2 Elektroda.....	39
III.5 Peralatan Penelitian	39
III.6 Tahapan Penelitian	40
III.6.1 Parameter Pengelasan.....	40

III.6.2 Preparasi Material.....	41
III.6.3 Preheat.....	41
III.6.4 Pengelasan SMAW.....	41
III.6.5 Preparasi Spesimen Pengujian.....	41
III.6.6 Proses Post Welding Heat Treatment (PWHT)	42
III.6.7 Proses Pengujian.....	42
III.6.7.1 Uji Kekerasan.....	42
III.6.7.2 Metalografi	43
III.6.7.3 Scanning Electrone Microscope	45
III.7 Jadwal Penelitian.....	46
BAB IV	47
IV.1 Hasil Pengujian	47
IV.1.1 Pengamatan secara makro	47
IV.1.2 Pengujian Metalografi.....	48
Gambar 4. 6 Struktur mikro pada daerah base metal. Spesimen 2 (E309mol-16). P, pearlite. F, ferrite. SC, spheroidal carbon	50
Gambar 4. 7 Struktur mikro pada material exhaust manifold bagian HAZ perbesaran 500X. Spesimen 1 (ENiFe-CI).	50
Gambar 4. 8 Struktur mikro pada material exhaust manifold bagian HAZ dengan. Spesimen 2 (E309mol-16). P, pearlite. F, ferrite. SC, spheroidal Carbon.....	51
IV.1.3 Uji SEM	53
IV.1.4 Uji Hardness.....	55
IV.2 Pembahasan.....	59

BAB V	63
V.1 Kesimpulan.....	63
V.2 Saran	63
DAFTAR PUSTAKA.....	65
LAMPIRAN	68
UCAPAN TERIMA KASIH	74
BIODATA PENULIS.....	76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C.....	6
Gambar 2. 2 Diagram fasa Besi-carbon untuk komersial besi cor, dan skema mikrostruktur berbagai besi cor. (Callister, 2007).....	8
Gambar 2. 3 Besi cor nodular, memperlihatkan bentuk spheroid grafit yang bulat dan kompak.....	11
Gambar 2. 4 Grafit nodul akibat percabangan.....	12
Gambar 2. 5 Pertumbuhan grafit Nodul dari gelembung gas	13
Gambar 2. 6 A) Besi cor nodular dengan matriks pearlit-ferrit. B) pearlite, cementit dan ledeburit yang terbentuk pada besi cor nodular.....	14
Gambar 2. 8 Struktur mikro Widmanstatten dan Bainit.....	15
Gambar 2. 7 Mikrostruktur pada besi cor nodular Ferrit (F), Pearlit (P), Ledeburit (L), Cementit (C), Plate Martensit (PM), Fine Martensit (FM), Articular Ferrit (AF) dan Austenit (A)	15
Gambar 2. 9 Exhaust manifold.....	17
Gambar 2. 10 Distribusi temperature las (Krishnasamy, 2012) ..	19
Gambar 2. 11 Kueva CCT besi cor nodular	20
Gambar 2. 12 Skema representasi dari SMAW.....	23
Gambar 2. 14 PWHT lokal.....	31
Gambar 2. 13 PWHT dalam furnace.....	31
Gambar 2. 15 Penggunaan indenter pada Rockwell, Vickers, dan Brinell.....	33
 Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	 37
Gambar 3. 2 Mesin Uji Kekerasan	43
Gambar 3. 3 Mikroskop Optik	45
Gambar 3. 4 <i>Scanning Electrone Microscope</i>	46

Gambar 4. 1 Hasil pengelasan dengan filler E309Mol-16	47
Gambar 4. 2 Hasil pengelasan dengan filler CIN-2	47
Gambar 4. 3 Struktur mikro base perbesaran 200X. F, ferrite. P, pearlite, SC, spheroidal carbon	48
Gambar 4. 4 Struktur mikro base perbesaran 500X. F, ferrite. P, pearlite, SC, spheroidal carbon	49
Gambar 4. 5 Struktur mikro pada daerah base metal. Spesimen 1 (ENiFe-CI). P, pearlite. F, ferrite. SC, spheroidal carbon	49
Gambar 4. 6 Struktur mikro pada daerah base metal. Spesimen 2 (E309mol-16). P, pearlite. F, ferrite. SC, spheroidal carbon	50
Gambar 4. 7 Struktur mikro pada material exhaust manifold bagian HAZ perbesaran 500X. Spesimen 1 (ENiFe-CI).	50
Gambar 4. 8 Struktur mikro pada material exhaust manifold bagian HAZ dengan. Spesimen 2 (E309mol-16). P, pearlite. F, ferrite. SC, spheroidal Carbon.	51
Gambar 4. 9 Weld metal dengan filler ENiFe-CI	52
Gambar 4. 10 Weld metal dengan filler E309Mol-16	52
Gambar 4. 11 Hasil SEM pada daerah Base	53
Gambar 4. 12 Hasil SEM pada daerah HAZ	53
Gambar 4. 13 Hasil SEM pada daerah Base	54
Gambar 4. 14 Hasil SEM pada daerah HAZ	54
Gambar 4. 15 Lokasi indentasi pengujian brinell pada spesimen yang dilas dengan ENiFe-CI	55
Gambar 4. 16 Lokasi indentasi pengujian brinell pada spesimen yang dilas dengan E309 mol-16	56
Gambar 4. 17 Grafik perbandingan nilai hardness 3 spesimen	58

DAFTAR TABEL

Tabel II. 1 komposisi kimia besi cor	8
Tabel II. 2 klasifikasi dari besi cor dengan desain komersil, mikrostruktur, dan patahan.....	10
Tabel II. 3 komposisi kimia besi tuang FCD 600 atau ASTM 80- 60-03.....	16
Tabel II. 4 sifat mekanik besi tuang FCD 600 atau ASTM 80-60- 03	16
Tabel II. 5 Klasifikasi elektroda untuk posisi pengelasan	26
Tabel II. 6 Klasifikasi electrode untuk jenis <i>coating</i> , penetrasi,, dan jenis arusnya	26
Tabel II. 7 Klasifikasi elektroda Berdasarkan unsur paduannya	27
Tabel II. 8 Range of Carbon Equivalent and Treatment recommended	28
Tabel II. 9 Weldability berdasarkan Carbon Equivalent	29
Tabel III. 1 Rancangan Penelitian	38
Tabel III. 2 Komposisi kimia material FCD 600.....	39
Tabel III. 4 Klasifikasi elektroda.....	39
Tabel III. 5 <i>Filler Chemical Composition</i>	39
Tabel III. 6 Parameter Pengelasan dengan menggunakan ENiFe- CI dan E309Mo-16.....	40
Tabel III. 7 Jadwal Penelitian.....	46
Tabel IV. 1 Data Hardness Material Asli	56
Tabel IV. 2 Nilai Hardness Rata-rata setelah dilas dengan kedua filler	57

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PEDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. Komatsu Remanufacturing Asia (KRA) adalah sebuah perusahaan yang bergerak pada produk remanufaktur dari komponen alat berat dengan *brand* komatsu. KRA didirikan berdasarkan *Memorandum of Understanding* (MoU) yang disepakati pada tanggal 17 Desember 1996. PT. Komatsu Remanufacturing Asia bergerak pada bidang remanufacturing atau remaintenance ketika terdapat kerusakan pada komponen di salah satu Unit besar Komatsu. Pada masa modern seperti ini kemajuan salah satu negara bisa dilihat dari kemajuan teknologinya, terutama pada bidang bidang seperti teknologi industrinya. Pada kasus ini Indonesia yang notabenenya merupakan negara yang kaya akan hasil tambang buminya membutuhkan banyak fasilitas pendukung berupa teknologi teknologi yang bergerak di industri pertambangan baik berupa manpower ataupun seperti fasilitas pendukungnya seperti alat-alat berat yang dipergunakan. Pada kasus ini, kebutuhan alat berat yang nantinya dipergunakan dalam dunia pertambangan jumlahnya banyak sekali dan jam kerja yang dibutuhkan untuk setiap unitnya bekerja juga sangat tinggi. Tingginya jam kerja yang dilakukan setiap mesin dari unit alat berat ini tentunya menyebabkan berkurangnya umur pakai dan bahkan kerusakan engine yang bisa terjadi karena factor lifetime atau beban yang berlebih. Salah satu permasalahan yang sering terjadi pada alat berat adalah kerusakan pada exhaust manifold yang menerima beban panas yang akhirnya dapat menyebabkan keretakan (*crack*). Exhaust manifold merupakan komponen pada sistem pembuangan yang langsung menempel pada Cylinder head. Aliran gas buang yang melewati komponen ini memiliki temperature 600-700⁰C yang nantinya dianggap sebagai temperature kerja dari exhaust manifold, bentuk dari aliran pipa yang memiliki siku menghasilkan aliran turbulensi disekitar area siku dan akhirnya menimbulkan beban panas yang



berlebih, inilah alasan terjadinya crack pada komponen ini. Kerusakan ini berdampak pada sistem pembuangan dan akhirnya menyebabkan kegagalan pada unit. Hal ini dapat mengurangi efisiensi dalam aktivitas tambang dan untuk mengurangi pengeluaran yang berlebih dengan membeli part baru maka dipilihlah metode perbaikan pada part ini.

Oleh sebab itu, dilakukanlah penelitian tugas akhir untuk memperbaiki kerusakan dengan proses pengelasan *Exhaust manifold* (FCD600) pada alat berat dengan metode pengelasan SMAW yang megacu pada data-data perusahaan yang telah didapatkan.

1.2 Perumusan Masalah

Proses pengelasan SMAW dipilih dalam proses perbaikan pada exhaust manifold yang rusak akibat aliran turbulen dan temperature tinggi pada bagian siku pipa berupa crack. Maka permasalahan yang dibahas dalam proses pengelasan *Exhaust manifold* (FCD600) ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penambahan elektroda ENiFe-CI dan E309Mo-16 terhadap struktur mikro hasil lasan?
2. Bagaimana pengaruh penambahan elektroda ENiFe-CI dan E309Mo-16 terhadap morfologi butiran hasil lasan?
3. Bagaimana pengaruh pengelasan dengan menggunakan elektroda ENiFe-CI dan E309Mo-16 terhadap sifat mekanik pada material FCD 600?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisis permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan sebagai berikut:

1. Material FCD 600 didapat langsung dari perusahaan
 2. Kecepatan pengelasan dianggap konstan
 3. Sudut pengelasan yang digunakan pada proses pengelasan dianggap konstan
 4. Tidak ada pengaruh dari lingkungan.
-



1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan proses pengelasan *Exhaust manifold* (FCD600) ini adalah :

1. Menganalisa pengaruh penambahan elektroda ENiFe-CI Komatsu dan E309Mo-16 terhadap struktur mikro hasil lasan.
2. Menganalisa pengaruh penambahan elektroda ENiFe-CI dan E309Mo-16 terhadap morfologi butiran hasil lasan.
3. Menganalisa pengaruh pengelasan dengan menggunakan elektroda ENiFe-CI dan E309Mo-16 terhadap sifat mekanik pada material FCD 600.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan penanganan bila terjadi kegagalan dikemudian hari dan dasar pengembangan pada ilmu berikutnya.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

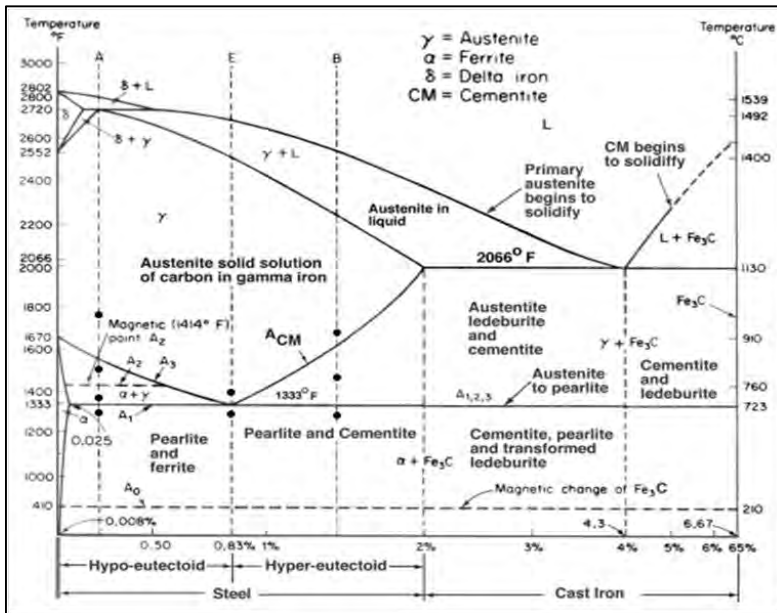
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Klasifikasi dan Metalurgi Dasar Besi Cor

II.1.1 Pengertian besi cor

Menurut ASM *Metal Handbook vol.1*, Besi cor merupakan paduan besi multikomponen, yang membeku secara eutektik. Besi cor memiliki kadar karbon dan silikon yang lebih tinggi daripada baja. Karena tingginya kadar karbon, struktur besi cor berbeda dengan baja, yaitu adanya fase dari karbon. Tergantung dari komposisi, laju pendinginan, dan *melt treatment*, besi cor dapat membeku berdasarkan system metastabil Fe-Fe₃C secara thermodinamika atau sistem Fe-Gr yang stabil. Ketika pembekuan terjadi dengan cara metastabil, fasa yang kaya karbon dalam eutektik adalah karbida besi, sdangkan ketika pembekuan terjadi secara stabil, fasa yang kaya karbon adalah grafit. Mengacu kepada sistem binary Fe-Fe₃C (Gambar 2.1) atau sistem Fe-Gr, besi cor dapat didefenisikan sebagai paduan besi-karbon dengan lebih dari 2%C .Silicon dan elemen paduan lainnya diduga merubah kelarutan maksimum dari karbon dalam fasa austenite (γ). Sedangkan, dalam kasus pengecualian, paduan kurang dari 2%C dapat terlarut dengan struktur eutektik dan meskipun begitu masih tetap tergolong dalam keluarga besi cor.



Gambar 2. 1 Diagram Fasa Fe-Fe₃C (ASM vol. 1)

Bentuk dari eutektik stabil dan metastabil adalah sebuah fungsi dari banyak factor termasuk potensi pengintian dari liquid, komposisi kimia, dan laju pendinginan. Dua factor pertama mendeterminasikan potensi grafitisasi dari sebuah besi. Potensi grafitisasi besi yang tinggi menghasilkan besi dengan grafit sebagai fasa yang kaya karbon, sementara potensi grafitisasi yang rendah akan menghasilkan besi dengan karbida besi didalamnya.

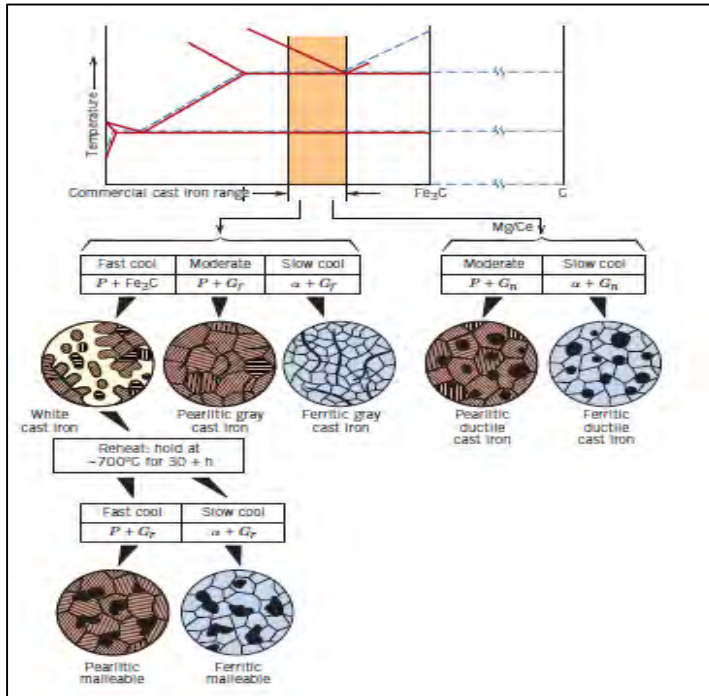
Dua tipe dasar dari eutektik, austenite stabil-grafit atau metastabil austenite-besi karbida (Fe₃C), memiliki perbedaan yang luas pada sifat mekaniknya seperti kekuatan, kekerasan, ketangguhan, dan ductility. Meski begitu, cakupan dasar dari proses metalurgi dari besi tuang adalah untuk memanipulasi tipe, jumlah, dan morfologi dari eutektik untuk mencapai sifat mekanik yang diinginkan



II.1.2 Klasifikasi

Awalnya, klasifikasi pertama dari besi cor adalah berdasarkan patahannya. Dua tipe dari besi secara inisial dikenal:

- Besi cor putih: menunjukkan patahan permukaan kristalin yang berwarna putih karena patahan muncul di sekitar plat karbida besi; ini adalah hasil dari pembekuan metastabil (Fe_3C eutektik)
- Besi cor kelabu: menunjukkan patahan permukaan berwarna kelabu. Karena patahan muncul disekitar serpihan grafit; ini adalah hasil dari pembekuan stabil (Gr eutektik)



Gambar 2. 2 Diagram fasa Besi-carbon untuk komersial besi cor, dan skema mikrostruktur berbagai besi cor. (Callister, 2007)

Tabel II. 1 Komposisi kimia besi cor (ASM vol.1)

Type of Iron	Composition, %				
	C	Si	Mn	P	S
Gray (FG)	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.002-1.0	0.02-0.25
Ductile (SG)	3.0-4.0	1.8-2.8	0.1-1.0	0.01-0.1	0.01-0.03
White	1.8-3.6	0.5-1.9	0.25-0.8	0.006-0.2	0.06-0.2
Malleable (TG)	2.2-2.9	0.9-1.9	0.15-1.2	0.02-0.2	0.02-0.2



Dengan berkembangnya ilmu metalografi, dan sebagai badan dari ilmu pengetahuan yang bersangkutan ke besi cor meningkat, klasifikasi lain berdasarkan mikrostruktur menjadi mungkin, seperti yang tertera pada gambar 2.2 dan tabel II.1:

- Bentuk grafit: lamellar (serpih), grafit (FG), spheroidal (nodular), kompak (vermicular), dan grafit temper (TG); hasil dari grafit temper dari proses metastabil (melleabilization)
- Matrix: Ferritic, pearlitik, austeniti, martensitic, dan bainitic (austempered)

Klasifikasi ini jarang digunakan oleh orang pengecoran. Terminologi yang digunakan secara luas adalah yang digunakan untuk dagang. Sebuah divisi pertama dapat dibuat menjadi dua kategori:

- Besi cor umum: untuk keperluan umum, tidak dipadukan atau berpaduan rendah
- Besi cor special: untuk keperluan special, secara umum paduan tinggi

Korespondensi antara klasifikasi komersial dan mikrostruktural, sama baiknya dengan tingkat proses yang didapatkan besi cor umum, ditunjukkan oleh tabel II.2. sebuah klasifikasi dari besi cor dengan nama komersi dan struktur juga diberikan dalam artikel “*Classification of ferrous casting alloy*” dalam pengecoran, volum 15 dari ASM Handbook, edisi ke-9 tals Handbook.



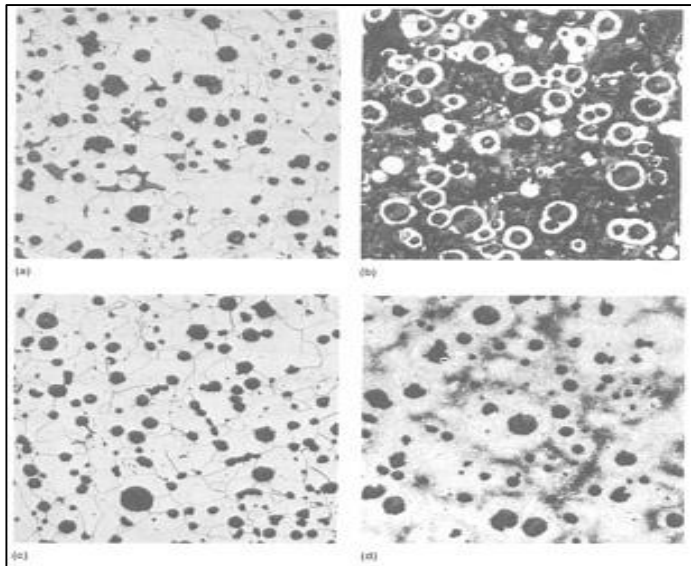
Tabel II. 2 Klasifikasi dari besi cor dengan desain komersil, mikrostruktur, dan patahan (ASM vol.1)

Commercial designation	Carbon-rich phase	Matrix(a)	Fracture	Final structure after
Gray iron	Lamellar graphite	P , F	Gray	Solidification
Ductile iron	Spheroidal graphite	F, P, A	Silver-gray	Solidification or heat treatment
Compacted graphite iron	Compacted vermicular graphite	F, P	Gray	Solidification
White iron	Fe_3C	P, M	White	Solidification and heat treatment(b)
Mottled iron	Lamellar Gr + Fe_3C	P	Mottled	Solidification
Malleable iron	Temper graphite	F, P	Silver-gray	Heat treatment
Austempered ductile iron	Spheroidal graphite	At	Silver-gray	Heat treatment

II.2. Besi Cor Nodular

Besi Cor Nodular dikenal juga dengan nama *ductile iron*, *spheroidal graphite iron (SG Iron)*, atau *spherulitic iron*. Dari namanya dapat di terka bahwa pada besi tuang ini grafit berbentuk bola-bola kecil (spheroid). Karena grafitnya yang berbentuk spheroid yang padat (compact) ini kekuatan dan ketangguhannya lebih tinggi daripada besi tuang dengan grafit berbentuk flake (besi tuang kelabu).

Berbeda dengan besi tuang mampu tempa, grafit yang berbentuk spheroid ini diperoleh langsung dari pembekuan, bukan dari suatu proses laku panan. Disampaing itu spheroid ini lebih bulat dah kompak dari pada temper carbon pada besi tuang mampu tempa (gambar 2.3).



Gambar 2. 3 Besi cor nodular, memperlihatkan bentuk spheroid grafit yang bulat dan kompak (ASM vol.1)

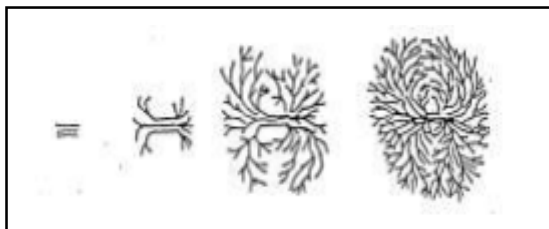
Besi Cor nodular didapatkan dengan menambahkan beberapa unsur selama proses pembekuan seperti magnesium ataupun cerium maka dapat mengubah bentuk dari graphite besi tuang menjadi bulat (spheroidal). Berubahnya bentuk graphite dari besi tuang tersebut berpengaruh terhadap sifat mekaniknya. Dengan bentuk yang lebih spheroidal maka besi tuang tersebut akan memiliki keuletan (ductility) 5 sampai 20 kali lebih tinggi jika dibandingkan besi tuang yang memiliki graphite berbentuk flake.

Penambahan magnesium dan atau serium (saat fasa cair belum terbentuk grafit atau sementit) terhadap besi ketika dalam fasa cair dapat menyebabkan karbon yang terbentuk dalam besi berubah bentuk yang semula serpihan menjadi bulat. Dan perubahan ini menimbulkan karakter keuletan (ductility) besi cor meningkat. Fasa matrik yang mengelilingi grafit berupa perlit dan ferit bergantung pada perlakuan panas setelah proses pengecoran,



Dalam keadaan normal setelah pengecoran, matrik didominasi oleh perlit tetapi setelah mengalami perlakuan panas dengan temperatur 700°C , matrik ferit mendominasi di sekitar grafit. Besi cor nodular mempunyai karakteristik mendekati baja, sebagai contoh besi cor nodular ferit mempunyai kekuatan tarik 380-480 MPa dengan keuletan 10 – 20% (ASM Metal Handbook Vol.1). Struktur matriks tergantung pada komposisi dan laju pendinginan. Matriks yang terdiri dari ferit dan sedikit pearlit dinamakan besi tuang nodular ferritik. Struktur tersebut memiliki keuletan, ketangguhan dan machinability paling tinggi. Struktur matrik yang sebagian besar terdiri dari pearlite dapat diperoleh dari normalising dengan temperatur pemanasan 870°C - 900°C kemudian didinginkan dengan media udara. Besi tuang nodular pearlitic memiliki kekuatan lebih tinggi daripada ferritic tetapi keuletannya lebih rendah. Pada besi cor nodular pembekuan grafit nodul dimulai pada temperatur yang lebih tinggi dari temperatur eutektik austenite grafit serpih, pada karbon ekuivalen yang sama. Dalam hal ini grafit bulat dikelilingi oleh austenit. Sehingga hanya ada satu fasa (austenit) yang kontak dengan cairan eutektik (Gambar 2.2). Pertumbuhan grafit nodul ini terdapat dua pendapat yaitu :

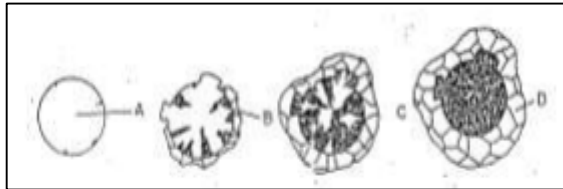
1. Grafit yang tumbuh karena selalu mencabang sehingga membentuk nodul seperti pada Gambar 2.4:



Gambar 2. 4 Grafit nodul akibat percabangan



2. Terbentuk gelembung gas, kemudian grafit menempati rongga tersebut. Seperti ditunjukkan pada gambar 2.5:



Gambar 2. 5 Pertumbuhan grafit Nodul dari gelembung gas (Charles, 1981)

Keterangan :

A. Gelembung gas

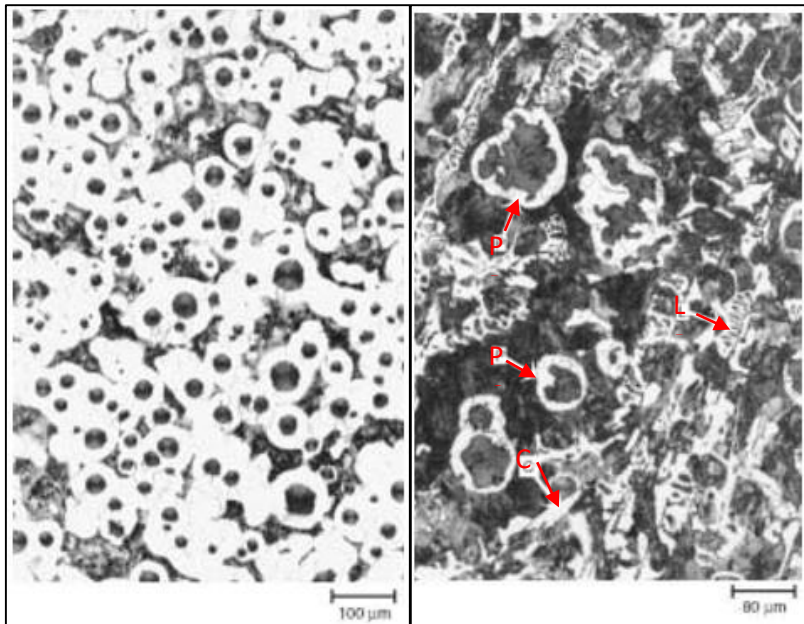
C. Logam cair

B. Serabut grafit

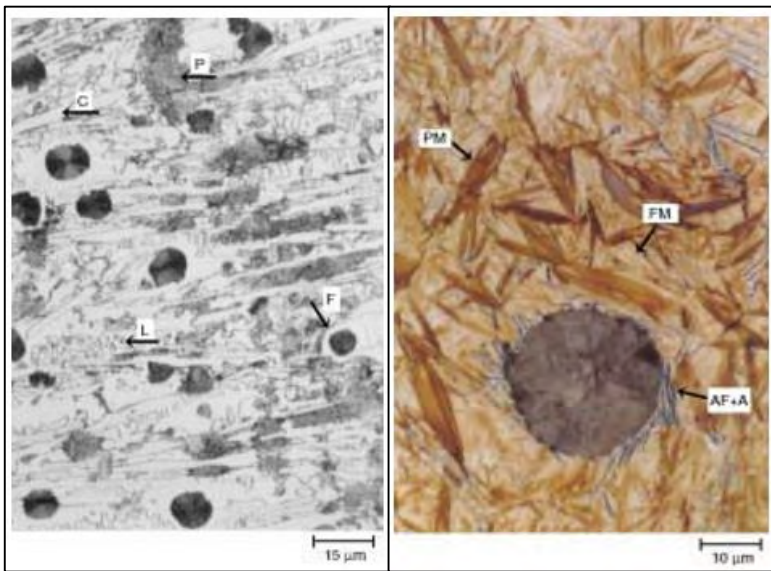
D. Besi yang sudah dipadatkan

II.2.1 Mikrostruktur dan Fasa Pada Besi Cor Nodular

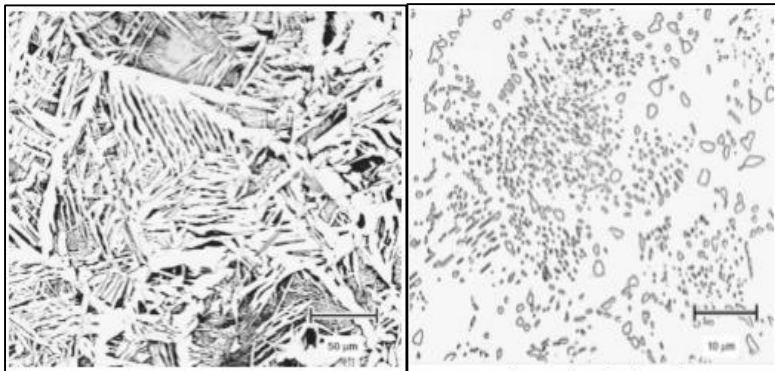
Dengan tingginya kadar karbon pada besi cor nodular maka semakin banyak pula kemungkinan fasa yang terbentuk pada matriksnya. Mikrostruktur yang mungkin terdapat pada matriks besi cor nodular seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 dan 2.7 dan beberapa foto mikrostruktur beberapa fasa yang ditunjukkan gambar 2.8.



Gambar 2. 6 A) Besi cor nodular dengan matriks pearlit-ferrit. B) Pearlite, cementit dan ledeburit yang terbentuk pada besi cor nodular (ASM vol.1)



Gambar 2. 7 Mikrostruktur pada besi cor nodular Ferrit (F), Pearlit (P), Ledeburit (L), Cementit (C), Plate Martensit (PM), Fine Martensit (FM), Articular Ferrit (AF) dan Austenit (A). (Janina M. Radzikowska, Metallography and microstructure of cast iron)



Gambar 2. 8 Struktur mikro Widmanstätten dan Bainit (ASM vol.9)



II.3 Besi Tuang Nodular JIS FCD 600

Besi tuang FCD 600 merupakan jenis besi tuang nodular yang setara dengan ASTM 80-60-03. Besi tuang jenis ini diklasifikasikan kedalam jenis besi tuang kelabu, tetapi ada beberapa sumber yang menyatakan bahwa besi tuang jenis ini juga termasuk kedalam besi tuang ductile. Adapun komposisi dari besi tuang JIS FCD 600 ini seperti pada tabel II.3:

Tabel II. 3 Komposisi kimia besi tuang FCD 600 atau ASTM 80-60-03

Material	C%	Si%	Mn%	P%	S%
FCD600	4.00	2.5	0.80	0.06 (Max)	0.02 (Max)

Dengan komposisi kimia seperti ini besi tuang FCD 600 memiliki spesifikasi sifat mekanik seperti yang dijelaskan dalam table II.4 berikut:

Tabel II. 4 Sifat mekanik besi tuang FCD 600 atau ASTM 80-60-03

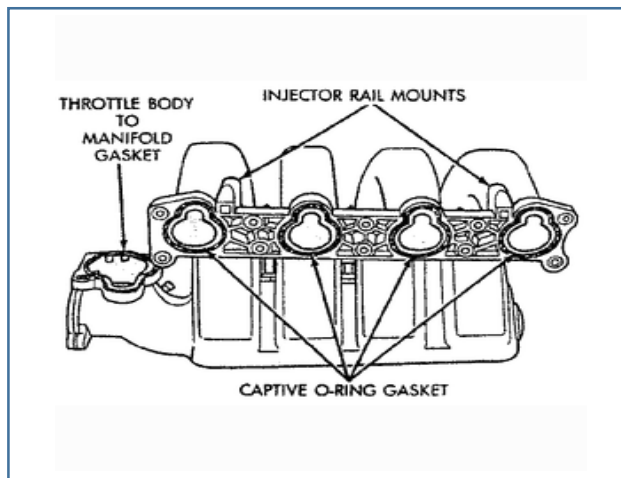
Material	Sifat Mekanik			
	Tensile strength (N/mm ²)	Proof Strength (N/mm ²)	Elongation %	Hardness (HB)
FCD 600	600	370	3 min	192-269

II.4 Exhaust Manifold

Exhaust manifold dalam dunia otomotif berfungsi untuk mengumpulkan gas keluar dari beberapa silinder kedalam satu pipa. Exhaust manifold pada alat berat bekerja pada temperatur



600-700°C *Exhaust manifold* secara umum terbuat dari besi tuang atau *Stainless steel*. Dalam dunia otomotif, *Exhaust manifold* juga dikenal dengan istilah *Header*. Ini terdiri dari kepala pipa keluar tersendiri untuk setiap silinder yang nantinya dikumpulkan dalam satu pipa dalam sistem pembuangan, *headers* yang tidak memiliki pengumpul disebut *zoomie headers* seperti gambar 2.9



Gambar 2. 9 Exhaust manifold

II.5 Definisi Pengelasan

Pengelasan adalah suatu proses penyambungan dua material melalui peleburan lokal yang di dasarkan kepada perpaduan faktor temperature, tekanan, dan kondisi metalurgi bahan. (Khan, 2007) Menurut AWS (American Welding Society) adalah proses penyambungan material dengan memanaskannya hingga mencapai temperatur pengelasan. Sementara, berdasarkan DIN (Deutsche Industrie Normen), pengelasan adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dari definisi tersebut, dapat dikatakan bahwa pengelasan adalah penyambungan lokal pada material yang



menggunakan energi panas.

Dalam proses pengelasan, terdapat hal yang harus diperhatikan sebelum dilakukan pengelasan, yaitu adalah mengetahui weldability dari logam yang akan di las. Weldability adalah kemampuan dari suatu logam untuk dapat menghasilkan las-lasan yang baik. Weldability yang baik meliputi banyak faktor yang saling terkait, antara lain: Jenis logam dan komposisi elemen kimia nya, proses las yang di gunakan, rancangan dan pemilihan parameter las, dimensi benda kerja, dan perlakuan panas yang dit menentukan sesuaikan dengan spesifikasi, kondisi lingkungan dan temperatur operasi yang di gunakan. (Musaikan, 1997)

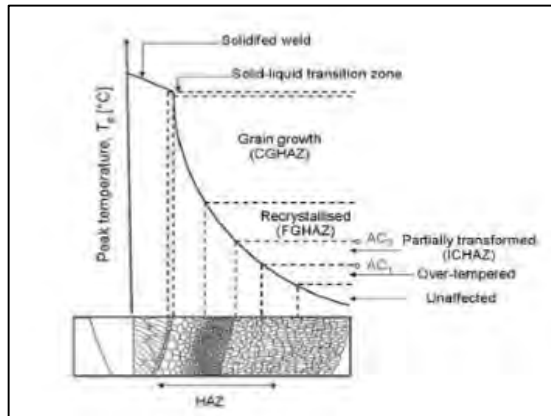
Faktor-faktor tersebut sangat menentukan weldability nya, apabila diabaikan salahsatu nya akan dapat menyebabkan adanya retak pada hasil las, distorsi, maupun cacat las lainnya. (Musaikan, 1997). Ketika proses pemanasan berlangsung memungkinkan beberapa hal terjadi pada lasan. Dengan input panas yang kecil maka mengharuskan kecepatan pengelasan yang relatif lebih lambat yang artinya daerah yang dipengaruhi oleh panas dan berubahstruktur mikro nya menjadi semakin luas, atau dengan kata lain Heat Affected Zone (HAZ) nya menjadi lebih besar. Hal yang sebaliknya pun akan terjadi apabila input panas nya besar.

II.6 Metalurgi Pengelasan

Dalam teknik pengelasan dikenal tiga daerah lasan, yaitu logam induk, logam las, dan daerah yang dipengaruhi oleh panas atau HAZ. Logam induk adalah logam dasar yang struktur dan sifat nya tidak berubah akibat panas dan temperatur selama proses pengelasan. Daerah logam las atau fusion zone adalah bagian logam yang mencair dan kemudian membeku selama proses pengelasan. Sementara daerah HAZ logam induk yang bersebalahan dengan logam las dan mengalami siklus pemanasan dan pendinginan cepat. Dan yang terakhir adalah daerah HAZ, yaitu daerah batas yang membatasi daerah antara logam las dan logam induk. Daerah-daerah tersebut berbeda karena perbedaan

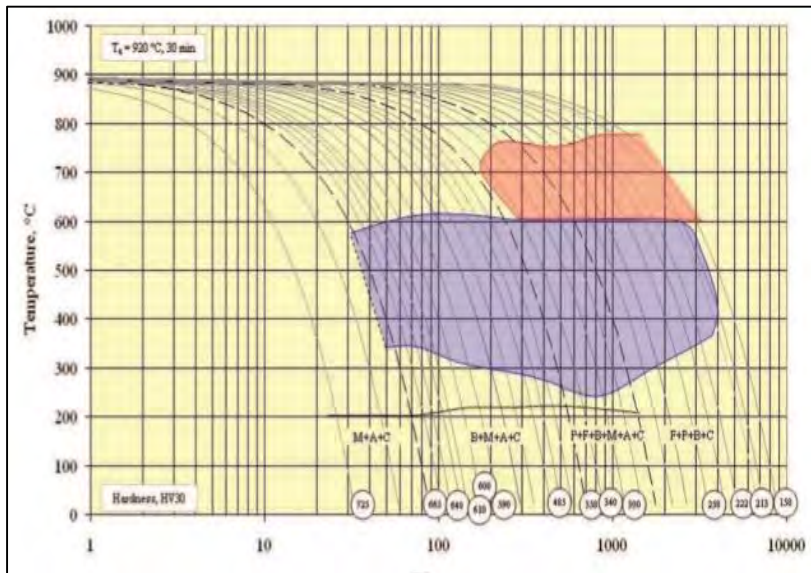


temperatur pemanasan saat proses pengelasan berlangsung. Perbedaan temperatur tersebut dapat dilihat pada gambar 2.10 berikut.



Gambar 2. 10 Distribusi temperature las

Struktur mikro suatu logam sangat memengaruhi sifat mekanisnya. Pada umumnya struktur mikro logam tergantung dari jenis logam, komposisi kimia, kecepatan pendinginan, dan temperatur awal sebelum terjadi transformasi. Biasanya dapat diamati melalui diagram fasa nya, TTT diagram (Time Temperature Transformation), CCT diagram (Continuous Cooling Transformation), dan siklus termal nya. Pada besi cor diagram CCT nya seperti pada gambar 2.11



Gambar 2. 11 Kurva CCT besi cor nodular (Radzikowska, Janina M. *Metallography and Microstructures of Cast Iron.*)

II.6.1 Parameter Pengelasan

Dalam proses pengelasan, banyak faktor yang menentukan kualitas dari hasil lasan, diantaranya adalah arus listrik, tegangan, kecepatan pengelasan, polaritas listrik, dan besar penetrasi las. Adanya arus listrik, tegangan, dan kecepatan, menjadikan hubungan yang menghasilkan energi pengelasan tersendiri yang di ketahui sebagai *heat input* (HI).

Heat input merupakan parameter yang penting karena akan mempengaruhi laju pendinginan yang artinya juga akan mempengaruhi sifat mekanik dan struktur mikro nya. Heat input itu sendiri merupakan nilai energi yang di transfer per satuan panjang dari suatu pengelasan. Apabila heat input dari suatu proses pengelasan terlalu tinggi maka akan berdampak pada semakin



luasnya daerah HAZ yang artinya akan semakin mudah terjadinya cacat seperti undercut. Namun apabila terlalu rendah juga dapat menimbulkan cacat inklusi, jadi perlu dihitung dengan sangat cermat. Efek dari heat input terhadap laju pendinginan hampir sama dengan temperatur pemanasan awal. Apabila heat input atau temperatur pemanasan awal dinaikkan maka laju pendinginan akan turun yang biasanya digunakan untuk base metal yang tebal. Masukan panas adalah besarnya energi panas tiap satuan panjang las ketika sumber panas bergerak.

Perpindahan panas dari sumber panas ke benda kerja berjalan tak sempurna dengan ditandai adanya panas yang hilang ke lingkungan. Besarnya panas yang hilang ke lingkungan ini menentukan efisiensi perpindahan panas. Fungsi utama sumber panas pada las cair (*fusion welding*) adalah untuk mencairkan

II.7 Arc Welding

Menurut *AWS Welding Handbook*, istilah Arc Welding sudah luas diterapkan, jenis dari proses pengelasan yang menggunakan busur listrik sebagai sumber panas. Hasil pengelasan antara dua metal dengan menggunakan proses ini tidak selalu melibatkan tekanan tetapi dapat memanfaatkan sebuah filler metal. Busur menyambar diantara benda kerja dan ujung elektroda. Intensitas panas yang dihasilkan oleh busur dengan cepat melelehkan sebagian *base metal*, menghasilkan bentuk dari lasan. Proses *arc welding* dapat dipindahkan sepanjang sambungan untuk menghasilkan las atau ditahan tetap sementara benda kerja digerakan selama proses.

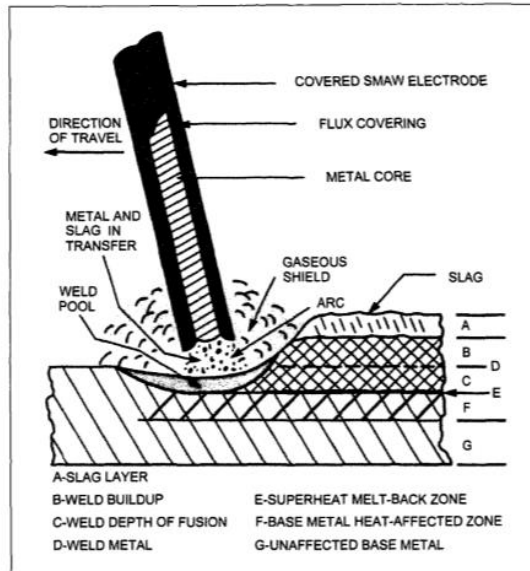
Pengerjaan *Arc welding* yang dilakukan dengan mengkonduksikan arus pengelasan melewati consumable electrode, yang berbentuk kabel atau kawat, atau nonconsumable electrode, berupa karbon atau kawat tungsten. Busur logam memanfaatkan consumable electrode yang mengkombinasikan electrode filler metal dengan base metal cair untuk menghasilkan las. Hal tersebut juga akan menghasilkan slag yang menutupi dan



melindungi logam cair dari oksidasi. Proses busur nonconsumable dapat menghasilkan lasan dengan hanya melelehkan base metal, menghasilkan apa yang disebut dengan *autogenous weld*. Jika filler metal dibutuhkan dalam proses nonconsumable, itu mungkin dapat memberi umpan baik secara manual atau secara mekanikal kedalam kolam logam cair. Dalam kasus ini, nonconsumable electrode hanya bertindak untuk menghasilkan busur (*arc*).

II.7.1 Shielded Metal Arc Welding

Menurut *AWS Welding Handbook*, ditunjukkan pada gambar 2.12, *shielded metal arc welding* (SMAW) adalah dasar, proses serba guna untuk mengelas *ferrous* atau *nonferrous metal*. Yang paling luas diketahui dari proses arc welding, shielded metal arc welding kadang mengacu kepada bahasa sehari-hari *stick welding* atau *simple arc welding*. Proses ini, yang mana diaplikasikan tanpa tekanan, menggabungkan kegunaan dari metal arc {sebuah busur yang mentransfer metal} yang dibentuk antara covered electrode dan weld pool. Electrode terdiri dari inti kawat yang dikelilingi sebuah campuran konsentris dari pengikat silikat dan material yang dibubukan seperti florid, karbonat, oksida, paduan logam, dan selulosa yang diekstrusi. Penutup ini berfungsi sebagai sumber dari penstabil busur dan uap untuk menghadang udara sebaik metal dan slag sebagai pelindung, penyokong, dan insulasi logam las panas. Umumnya, kualifikasi dari shielded arc metal dapat digunakan untuk mendeskripsikan jumlah dari proses busur. Bagaimanapun, bentuk ini unik untuk proses yang perlindungannya didapat dari dekomposisi dari pelapis elektroda yang habis oleh panas dari busur.



Source: Adapted from Linnert, G. E., 1994, *Welding Metallurgy*, 4th ed., Miami: American Welding Society, Figure 6.8.

Gambar 2. 12 Skema representasi dari SMAW (AWS D1.1)

Shielded Metal Arc Welding adalah pengelasan lebur dimana penyatuan logam dicapai dengan menggunakan panas dari busur listrik. Busur listrik yang di gunakan berasal dari pelepasan electron yang melewati celah dalam rangkaian, dan panas yang di hasilkan akan menyebabkan gas pada celah tersebut mengalami ionisasi. Untuk menghasilkan busur dalam pengelasan busur, elektroda di sentuhkan dengan benda kerja. Dua logam yang konduktif jika dialiri listrik dengan tegangan yang relatif rendah akan menghasilkan loncatan elektron yang menimbulkan panas tinggi. Energi listrik dari busur dapat menghasilkan panas mencapai 1500 OC atau bahkan lebih. (Joko Waluyo, 2013).

Bagian kosong dari elektroda di jepit di pemegang elektroda, yang nantinya akan disambungkan ke sumber tegangan dengan



kabel. Benda kerja disambungkan ke terminal sumber tegangan yang lain. Busur di inisiasi dengan menyentuhkan ujung dari electrode ke benda kerja dan kemudian menggeseknya secara perlahan. Panas dari busur melelehkan base metal di dekat area sepanjang dengan inti logam elektroda dan pelindung. Logam utama yang meleleh, inti kawat, dan bubuk metal dalam yang bersatu dalam pelindung untuk menghasilkan lasan.

Elektroda pengelasan yang dilindungi tersedia dalam rentang diameter dari 1/16 inci (in.) sampai 5/16 in. (2milimeter [mm] sampai 8mm). Diameter terkecil digunakan dengan arus rendah untuk sambungan dari bagian yang tipis, daerah kerja terbatas, dan pengelasan vertical dan pengelasan dengan posisi diatas kepala. Semakin besar diameter elektroda maka semakin besar arus yang dibutuhkan, untuk memproduksi rasio deposisi las yang besar. Dengan tinjauan ekonomi, tujuannya adalah untuk menggunakan elektroda dengan rasio deposisi yang tinggi dan arus pengerjaan tertinggi pada pemakaian. Alat-alat yang digunakan pada shielded metal arc welding adalah yang paling simple dan lebih murah daripada yang digunakan pada proses pengelasan listrik. Komponen yang dibutuhkan adalah sumber tegangan dengan rasio arus yang berkala dan siklus tugas, ukuran kabel listrik yang sesuai, dan pemegang elektroda, dan sebuah penjepit benda kerja. Alat bertugas, alat las dengan arus AC lebih murah dan dapat digunakan dengan elektroda yang lebih kecil untuk arus AC. arus alternative/ arus lnsung (AC/DC) atau sumber tegangan dc dapat digunakan dengan variasi elektroda yang lebih besar. Penggerak mesin portable dengan jarak kapabilitas dipasarkan dengan harga yang beraneka ragam, tergantung dari polaritas dan pilihan tegangan keluar. (Cynthia L. Jenney, Welding Handbook).

II.8 Heat Input

Analisa teori dari siklus termal pengelasan, dimulai dari persamaan aliran panas umum, sudah lama dicoba. Pada masa lalu,



hasil eksperimen dari transfer panas pengelasan telah sesuai untuk menyederhanakan persamaan yang di dekati dengan teori transfer panas, dan teknik-teknik dikembangkan untuk menghitung laju pendinginan, Temperature puncak dan dimensi *heat-affected zone*, dan laju pembekuan. Persamaan ini menunjukkan panduan untuk mengontrol hasil pengelasan dan memprediksi sifat spesifik yang diinginkan.

Sumber panas bersih dari lasan seperti persamaan 2.1 dan 2.2:

$$H_{net} = \frac{q}{v} \left(in \frac{J}{m} \right) \dots (2.1)$$

dan panas atau energy q untuk proses *arc welding* sebagai berikut

$$q = \eta EI \dots (2.2)$$

Dimana η adalah efisiensi transfer dari proses, E dan I adalah voltase (V) dan arus (A) pengelasan, dan v adalah kecepatan dari pengelasan atau *travel speed* (in m/s). (Robert W. Messler, Jr, 2004).

II.9 Filler Metal

Filler metal adalah material yang di tambahkan dengan tujuan untuk mengisi kekosongan diantara dua logam yang akan di sambung. Terdapat dua jenis filler metal yang banyak di gunakan dalam proses pengelasan, yaitu welding rods dan welding electrodes.

Sistem klasifikasi elektroda mengikuti pola yang sudah di atur dalam AWS A5.1. Untuk huruf “E” di awal menunjukan “Elektroda”. Dua (atau tiga) angka setelah nya adalah untuk menunjukan kekuatan tarik nya, contoh 70 (atau 110) yang berarti memiliki kekuatan tarik minimal 70 (atau 110) ksi di bagian weld metal nya. Untuk satu angka selanjutnya, menunjukan posisi welding yang dapat di lakukan, seperti pada tabel III.5, III.6 dan III.7.



Tabel II. 5 Klasifikasi elektroda untuk posisi pengelasan

Class	Weld position
Exx1x	Flat, Horizontal, Vertical (up), Overhead
Exx2x	Flat, Horizontal
Exx4x	Flat, Horizontal, Vertical (down), Overhead

Tabel II. 6 Klasifikasi electrode untuk jenis *coating*, penetrasi, dan jenis arusnya

Class	Electrode Coating	Penetration	Current
Exxx0	Cellulose, Potasium	Deep	DCEP
Exxx1	Rutile, Sodium	Deep	AC, DCEP
Exxx2	Rutile, Sodium	Medium	AC, DCEN
Exxx3	Rutile, Iron Powder	Light	AC, DCEP, DCEN
Exxx4	Rutile, Iron Powder	Medium	AC, DCEP, DCEN
Exxx5	Low Hydrogen, Sodium	Medium	DCEP
Exxx6	Low Hydrogen, Pottasium	Medium	AC, DCEP
Exxx7	Iron Powder, Iron Oxide	Medium	AC, DCEP
Exxx8	Low Hydrogen	Medium	AC, DCEP



Exxx9	Iron Oxide, Rutile, Potassium	Medium	AC, DCEP, DCEN
-------	-------------------------------------	--------	-------------------

Tabel II. 7 Klasifikasi elektroda Berdasarkan unsur paduannya

Class	Paduan
Exxxx-A	Carbon Molybdenum
Exxxx-B	Chromium Molybdenum
Exxxx-C	Nickeel Steel
Exxxx-D	Manganese Molybdenum
Exxxx-G	Unsur lainnya
Fxxxx	Carbon Manganese

II.10 Heat Treatment

Heat treatment merupakan proses dimana benda kerja akan dipanaskan baik sebelum ataupun sesudah proses pengelasan dengan tujuan untuk mengurangi laju pendinginan dan mengurangi tegangan sisa. Adapun jenis dari heat treatment dalam pengelasan adalah:

II.10.1. Preheat

Pre heat adalah pemanasan awal sebelum melakukan pengelasan. Secara umum preheat di gunakan untuk mengatur laju pendinginan pada proses pengelasan untuk mengurangi ataupun menghindari transformasi martensit di daerah HAZ. (Ilman, 2012). Preheat menjadikan kondisi logam lebih siap untuk menerima proses pengelasan. Temperatur minimum preheat bertujuan untuk menghindari adanya crack yang di pengaruhi oleh beberapa faktro, diantara nya; Karbon ekivalen, kondisi base metal, ketebalan base metal, dan risiko keberadaan hidrogen. (Sharma, Saluja, & Moeed, 2013)

Kegunaan preheating adalah untuk membantu melepaskan



tegangan sisa dan mencegah retak pada logam las. Gas hidrogen merupakan salah satu penyebab retak logam las, dimana gas hidrogen berdifusi pada logam yang di panaskandan bergerak menjauhi tempat awal dan mengalami transformasi. Dengan adanya preheat akan memperlambat laju pendinginan sehingga hidrogen yang berdifusi dalam logam las dapat keluar dan tidak terperangkap dalam logam las.

Selain itu, preheat juga dapat mengurangi pengerasan yang terjadi di HAZ dan mengurangi pengerasan logam di dekat area las. Pemberian preheat di tentukan oleh komposisi kimia logam, temperatri logam, lingkungan, dan tebal material.

Preheat sangat berkaitan dengan sifat mampu las atau weldability dari material tersebut. Sifat mampu las tersebut salah satunya di pengaruhi oleh komposisi material nya. Ketika ada pemaduan pada baja, maka kemungkinan di perlukannya preheat di hitung berdasarkan karbon ekivalennya. (Luckyta, 2012)

Menrut AWS D1.1, perhitungan karbon ekivalen dapat di tentukan dengan persamaan 2.3:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn + \%Si}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15} \dots (2.3)$$

Kemudian dari perhitungan tersebut disesuaikan dengan table perlakuan yang direkomendasikan.

Tabel II. 8 Range of Carbon Equivalent and Treatment recommended

Carbon Equivalent (%)	Weldability
Up to 0,35	Preheat optional
0,36-0,45	Preheat at 93 to 204 ⁰ C
Above 0,45	Preheat at 214-371 ⁰ C

Berdasarkan ASME BPVC section II SA-6 tahun 2001, adapun



Weldability berdasarkan Carbon Equivalent nya di klasifikasikan sebagai berikut:

Tabel II. 9 Weldability berdasarkan Carbon Equivalent

Carbon Equivalent (%)	Weldability
Up to 0,35	Excellent
0,36-0,40	Very good
0,41-0,45	Good
0,46-0,5	Fair
Over 0,5	Poor

II.10.2 Post Heat

Setelah komponen di sambung, akan terjadi distorsi dan residual stress di dalam struktur tersebut. Salah satu cara untuk menanggulangi hal tersebut adalah dengan post weld heat treatment. (Fang, 2005).

Post Weld Heat Treatment dapat di definisikan sebagai proses perlakuan panas yang di lakukan setelah pengelasan, umumnya di gunakan untuk meningkatkan sifat dari hasil lasan. Tujuan lain dari dilakukannya PWHT ini adalah untuk meminimalisasi potensi terjadinya Hydrogen Induced Cracking (HIC). (Funderburk, 1998)

Fungsi dari Post Weld Heat Treatment adalah untuk memperhalus martensit di bagian weld metal dan HAZ, yang bertujuan untuk mengurangi kekerasan dan meningkatkan ketangguhan, serta mengurangi residual stress yang terjadi selama proses pengelasan. Proses PWHT dapat dilakukan dengan berdasarkan pada paduan spesifik dan filler yang di gunakan. Selain itu juga dimensi, joint design, dan parameter pengelasan juga berpengaruh. (Sharma, Saluja, & Moeed, 2013).

Post weld heat treatment umumnya menggunakan temperatur di bawah temperatur kritis (sebelum bertransformasi



menjadi austenit). Temperatur yang di gunakan bergantung dari jenis material yang di gunakan. Dengan temperatur di bawah temperatur kritis tersebut menghasilkan strukutr yang lebih halus sehingga dapat mengurangi kemungkinan terjadi nya brittle failure. (Al-Olabi, 1994).

Prinsip dasar dari proses PWHT adalah:

- *Heating*, merupakan proses pemanasan hingga temperatur diatas ataupun di bawah temperatur kritis suatu material
- *Holding*, adalah menahan material pada temperatur pemanasan dengan tujuan memberikan kesempatan adanya perubahan struktur mikro
- *Cooling*, adalah proses pendinginan dengan kecepatan tertentu sesuai dengan sifat akhir material yang diinginkan.

Proses PWHT ini dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan di dalam furnace ataupun local (gambar 2.13 dan 2.14. Pemilihan mengenai metode mana yang harus digunakan menyesuaikan dengan dimensi spesimen dan faktor ekonomis nya.



Gambar 2. 13 PWHT dalam furnace



Gambar 2. 14 PWHT lokal



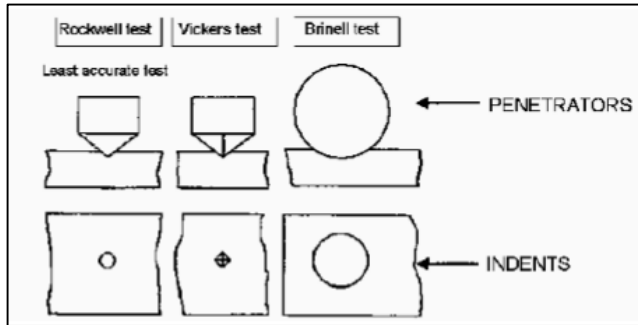
II.11 Sifat Mekanik Kekerasan

Kekerasan seperti yang digunakan dalam industri, dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk menahan lekukan atau deformasi permanen ketika kontak dengan indenter di bawah beban. Umumnya uji kekerasan terdiri dari menekan sebuah indenter yang diketahui geometri dan sifat mekanik dari bahan uji. Kekerasan bahan yang diukur menggunakan salah satu dari berbagai skala yang secara langsung atau tidak langsung menunjukkan hubungan tekanan yang terlibat dalam deformasi permukaan uji. Karena indenter ditekan ke dalam bahan selama pengujian. Kekerasan juga dipandang sebagai kemampuan suatu bahan untuk menahan beban tekan. Indenter biasanya adalah bola (Brinell test), piramida (Vickers dan tes Knoop), atau kerucut (uji Rockwell). Dalam Brinell, Vickers, dan tes Knoop, nilai kekerasan adalah beban yang didukung oleh satuan luas indentasi, dinyatakan dalam kilogramper milimeter persegi (kgf/mm^2). Dalam tes Rockwell, kedalaman lekukan pada beban yang ditentukan dan dikonversi ke angka kekerasan (tanpa satuan pengukuran), yang berbanding terbalik dengan kedalaman hasil indentasi.

Mengacu pada *Material Science and Engineering callister 7th edition page 155*, kekerasan adalah ukuran resistansi bahan terhadap deformasi plastik lokal (misalnya penyok atau goresan). Teknik kekerasan kuantitatif telah dikembangkan selama bertahun-tahun di dimana indenter kecil “dipaksa” masuk ke dalam permukaan material yang akan diuji dan kondisi beban yang terkontrol. Kedalaman atau ukuran yang dihasilkan diukur yang berhubungan dengan angka kekerasan. Lebih besar dan lebih dalam lekukan, dan rendah nomor indeks kekerasan. Hardnesses diukur hanya relatif (bukan absolut), dan perawatan harus dilakukan ketika membandingkan nilai yang dihitung berdasarkan teknik yang



berbeda. Pada gambar 2.15 ditunjukkan jenis indenter dan hasilnya



Gambar 2. 15 Penggunaan indenter pada Rockwell, Vickers, dan Brinell

II.12 Metallography

Metalografi adalah disiplin ilmu yang bertujuan memeriksa dan menentukan struktur yang mendasari suatu logam, paduan dan bahan. Kadang-kadang disebut materialography. Pemeriksaan struktur dapat dilakukan melalui berbagai panjang sisik atau tingkat pembesaran, mulai dari visual atau perbesaran rendah ($\sim 20 \times$) pemeriksaan ke perbesaran lebih dari $1.000.000 \times$ dengan mikroskop elektron. Metalografi juga dapat mencakup pemeriksaan struktur kristal dengan teknik seperti difraksi sinar-x. Namun, alat yang paling akrab adalah metalografi mikroskop cahaya, dengan perbesaran mulai dari $\sim 50-1000 \times$ dan kemampuan untuk menyelesaikan mikrostruktur $\sim 0.2 \mu\text{m}$ atau lebih besar.

Struktur logam terdiri fitur besaran. Skala ukuran struktur logam terdiri dari tingkat atom, $\sim 0,1 \text{ nm}$ ($\sim 1 \text{ \AA}$) dengan ukuran keseluruhan logam, $\sim 1 \text{ m}$ ($\sim 3 \text{ ft}$). Kisaran ini mencakup 10 kali lipat.

Metalografi merupakan pengamatan struktur logam baik secara makro maupun mikro dimana intinya adalah pengamatan struktur dan pengenalan yang meliputi tipe, ukuran, distribusi dan



kuantitas. Tipe mewakili nama kelas pada logam tertentu misalnya ferrit, perlit, eutectoid dan sebagainya. Ukuran mewakili dimensi dari fase dibandingkan dengan dimensi yang lain. Misalnya ukuran butir. Distribusi mewakili daerah penyebaran masing-masing fase diantara luasan yang menjadi pengamatan dalam sample tersebut, sedangkan kuantitas mewakili jumlah masing-masing fase.

Terdapat beberapa tahapan dalam metalografi ini, yaitu:

- a. Cutting Pemotongan spesimen sesuai dengan dimensi yang di butuhkan.
- b. Mounting Mounting dilakukan untuk mempermudah pemegangan spesimen saat proses grinding
- c. Grinding Grinding dilakukan dengann amplas silikon karbida mulai dari grade 80 hingga 2000. Sehingga akan di peroleh permukaan yang halus.
- d. Polishing Polishing dilakukan dengan pasta alumina dengan tujuan untuk memastikan tidak ada goresan pada permukaan
- e. Etching Proses etsa dengan menggunakan larutan tertentu yang sesuai dengan standar. Proses ini bertujuan untuk mengkorosikan batas butir
- f. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik

II.12.1 Etsa

Dalam pengujian *metallography* yang melibatkan material berupa besi cor, larutan etsa yang digunakan adalah Nital (Nitrit Alkohol) dengan konsentrasi 4% sesuai dengan standar ASTM E 407.



II.13 Scanning Electron Microscope

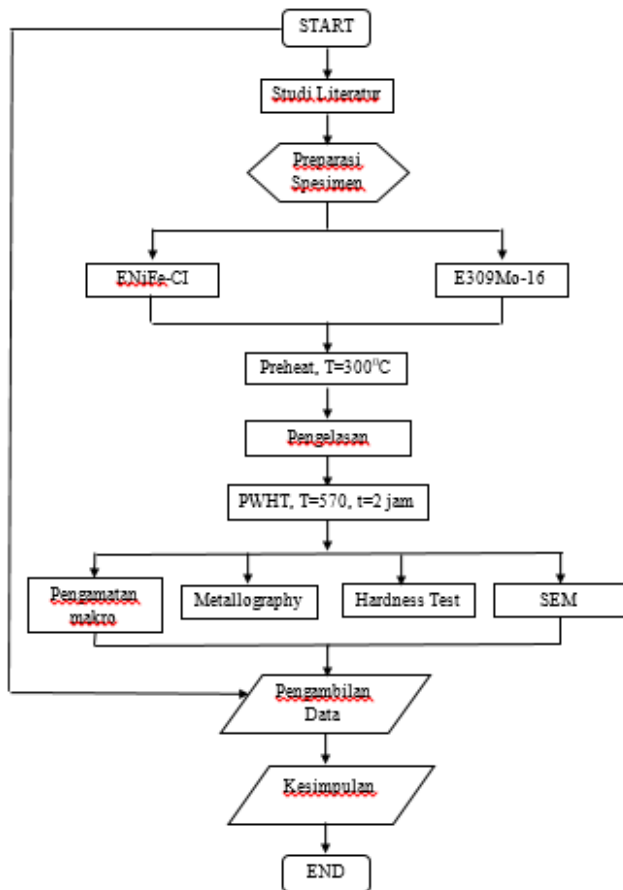
Pengujian dengan Scanning Electron Microscope (SEM) dilakukan untuk mengetahui morfologi dari suatu material. SEM merupakan jenis mikroskop elektron yang menghasilkan gambar sampel dengan memindai dengan sinar elektron yang difokuskan. Elektron berinteraksi dengan atom dalam sampel, untuk memproduksi berbagai sinyal yang dapat dideteksi dan yang mengandung informasi tentang morfologi permukaan, dengan melakukan pengujian ini akan tampak perbedaan morfologi dari suatu material.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PERCOBAAN

III.1 Diagram Alir Percobaan



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian



III.2 Rancangan Penelitian

Adapun rancangan penelitian ini adalah seperti yang tertera pada table III.1 berikut ini.

Tabel III. 1 Rancangan Penelitian

Filler	Daerah	Metallography Test	Hardness Test	SEM
ENiFe-CI	Base Metal FCD 600	V	V	V
	HAZ	V	V	V
	Weld Metal	V	V	
E309Mo-16	Base Metal FCD 600	V	V	V
	HAZ	V	V	V
	Weld Metal	V	V	

III.3 Metode Penelitian

Metode penelitian yang di gunakan dalam penelitian ini adalah studi lapangan, studi literature dan pengujian.studi lapangan mengacu pada pencarian informasi terkait komponen yang akan di teliti beserta kondisi operasi komponen. Studi literature yang mengacu pada handbook, buku penunjang, standar internasional, dan jurnal jurnal penelitian. Pengujian yang dilakukan adalah uji kekerasan, metalografi, dan uji SEM.

III.4 Bahan Penelitian

III.4.1 Material Uji

Material yang digunnnakan dalam penelitian ini adalah besi cor FCD600. Material ini meemiliki *chemical composition* dan sifat mekanik seperti yang tertera pada tabel III.2 dan tabel III.3 berikut ini.



Tabel III. 2 Komposisi kimia material FCD 600

Material	C%	Si%	Mn%	P%	S%
FCD600	4.00	2.5	0.80	0.06 (Max)	0.02 (Max)

Dengan komposisi kimia seperti ini besi tuang FCD 600 memiliki spesifikasi sifat mekanik seperti yang dijelaskan dalam table II.3 dan II.4

III.4.2 Elektroda

Elektroda yang digunakan dalam proses pengelasan ini adalah ENiFe-CI dengan filler E309Mo16 (*stainless steel electrode*)

Tabel III. 3 Klasifikasi elektroda

Filler	Type of Covering	Welding Position	Type of Current
ENiFe-CI	Rutile, Sodium	F,V,H,OH	AC,DC
E309Mo-16	Cellulose, Potassium	F,V,H,OH	AC,DC

Tabel III. 4 *Filler Chemical Composition*

Filler	C	Mn	Si	P	S	Fe	Ni	Cr
ENiFe-CI	1.1	0.4	0.5	0.01	0.01	Rem.	50	-
E309Mo-16	0.025	0.7	0.9	0.025	0.019	Rem.	13.00	22.5

III.5 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain:



1. Alat pemotong
2. Mesin Grinding dan Polishing
3. Gerinda
4. Mesin Wire cut
5. Kertas gosok grade 80-1500
6. Mesin uji hardness
7. Mikroskop optic
8. Larutan Etsa
9. SEM
10. Alat las SMAW
11. Furnace

III.6 Tahapan Penelitian

III.6.1 Parameter Pengelasan

Untuk mendapatkan kualitas hasil pengelasan yang baik, maka di perlukan parameter yang sesuai, Parameter pengelasan mengacu pada WPS dan AWS

Tabel III. 5 Parameter Pengelasan dengan menggunakan ENiFe-CI dan E309Mo-16

Parameters	ENiFe-CI	E309Mo-16
Voltage (volts)	25	25
Travel Speed (mm/min)	100	100
Current (ampere)	75	75
Preheat (°C)	300°C	300°C
Type & polarity	DCEP	DCEP



III.6.2 Preparasi Material

Preparasi awal dari material FCD 600 adalah melakukan proses pemotongan (*cutting*) material FCD 600. Dan dibagi menjadi 6 spesimen untuk proses pengelasan Asme dan JIS masing-masing 3 spesimen. Persiapan akhir sebelum dilakukannya pengelasan adalah membersihkan permukaan material dari pengotor agar tidak adanya inklusi dari slag selama proses pengelasan dan membersihkan material dari pengotor yang terdapat di dalam material agar dapat berdifusi sempurna.

III.6.3 Preheat

Setelah preparasi dilakukan untuk mendapatkan hasil yang maksimal dari proses pengelasan, *preheat* yang harus dilakukan untuk mendapatkan hasil yang maksimal. *Preheat* diperlukan untuk mengurangi laju dari *cooling rate*. Dan sesuai dengan AWS D1.1, yang menyatakan bahwa besi karbon dengan kadar karbon ekuivalen diatas 0,45 perlu diberikan *preheat* dalam furnace pada Temperatur 100-200°C.

III.6.4 Pengelasan SMAW

Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam proses pengelasan SMAW adalah:

1. Mempersiapkan mesin las SMAW
2. Mempersiapkan benda kerja yang akan di las
3. Posisi pengelasan dengan menggunakan posisi pengelasan mendatar
4. Meletakkan specimen yang akan di las diatas backing plate
5. Mempersiapkan material Filler
6. Mengatur arus dan tegangan sesuai dengan parameter pengelasan yang telah ditentukan
7. Melakukan proses pengelasan

III.6.5 Preparasi Spesimen Pengujian

Setelah dilakukan proses pengelasan sesuai dengan prosedur yang sudah dijelaskan diatas maka spesimen pengujian akan



diberikan tanda sesuai dengan standar proses pengelasan yang dilakukan. Spesimen juga akan ditandai untuk masing-masing pengujian yang akan dilakukan.

III.6.6 Proses Post Welding Heat Treatment (PWHT)

Proses PWHT dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu local disekitar daerah pengelasan dan didalam dapur. Pada penelitian kali ini metode yang digunakan dengan dimasukan dalam *furnace*. Temperatur PWHT yang digunakan akan berkisar pada 600-620°C sesuai dengan AWS D.1.1 dengan *holding time* selama 1 jam dan didinginkan didalam *furnace*.

III.6.7 Proses Pengujian

Proses pengujian dalam penelitian ini meliputi uji kekerasan (*hardness*), pengamatan struktur mikro, dan SEM.

III.6.7.1 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan ini dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan di daerah *Base metal* (FCD600), *heat affected zone* (HAZ), dan *weld metal* yang terkena dampak proses pengelasan. Standar pengujian kekerasan yang digunakan adalah dengan metode *Brinell* yang berdasarkan ASTM E 10. Dalam pengujian ini beban yang akan digunakan adalah sebesar 100 kg dan waktu lamanya indentasi 10 detik. Pengujian kekerasan brienell ini akan menggunakan *Universal Hardness tester HBRV 187,5 A*



di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS (Gambar 3.2).



Gambar 3. 2 Mesin Uji Kekerasan

III.6.7.2 Metalografi

Pada pengujian metalografi ini bertujuan untuk mengetahui fasa, bentuk dan ukuran struktur mikro pada daerah heat affected zone dan weld metal nya. Selain itu juga untuk memprediksikan transformasi yang terjadi selama proses pengelasan ataupun perlakuan panas. Pengujian ini menggunakan standar ASTM E3 dengan tahapan sebagai berikut ini:

a. Tahap persiapan

- Cutting : Pemotongan spesimen dilakukan dengan menggunakan gergaji mesin/manual.



- Mounting: Membuat pegangan untuk mempermudah pemegangan spesimen saat proses grinding
- Grinding : Menggosok spesimen dengan amplas silikon karbida mulai dari grade 60 hingga 2000. Sehingga akan di peroleh permukaan yang halus.
- Polishing : Memoles spesimen dengan pasta alumina dengan tujuan untuk memastikan tidak ada goresan pada permukaan
- Etching : Mencilupkan permukaan spesimen kedalam larutan etsa. Larutan etsa yang di gunakan adalah Nital.

b. Tahap pengamatan

- Tahap pengamatan dilakukan untuk mengamati struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik. Pengamatan dilakukan dengan beberapa kali perbesaran.

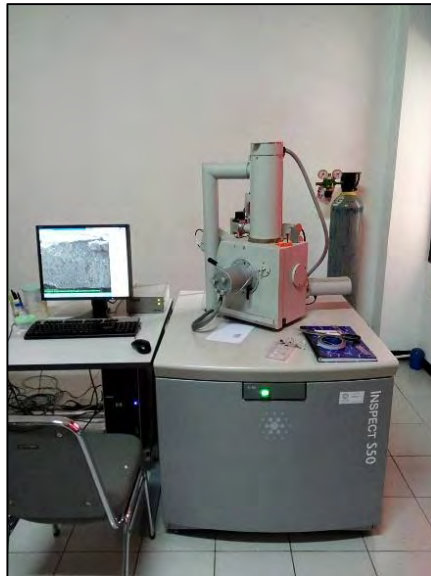
Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi , Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS dengan menggunakan mikroskop optik Olympus BX51M-RF (gambar 3.3).



Gambar 3. 3 Mikroskop Optik

III.6.7.3 Scanning Electrone Microscope

Pengujian dengan Scanning Electron Microscope (SEM) dilakukan untuk mengetahui morfologi dan pemetaan dari hasil didusi antara *weld metal* dan *Base metal*. SEM merupakan jenis mikroskop elektron yang menghasilkan gambar sampel dengan memindai dengan sinar elektron yang difokuskan. Elektron berinteraksi dengan atom dalam sampel, untuk memproduksi berbagai sinyal yang dapat dideteksi dan yang mengandung informasi tentang morfologi permukaan, dengan melakukan pengujian ini akan tampak perbedaan morfologi dari material FCD 600 yang di las dengan filler dari komatsu dan E309Mo-16 dengan Alat SEM Inspect S50. Gambar alat SEM dapat dilihat pada gambar 3.4 dibawah.



Gambar 3. 4 *Scanning Electrone
Microscope*

III.7 Jadwal Penelitian

Tabel III. 6 Jadwal Penelitian

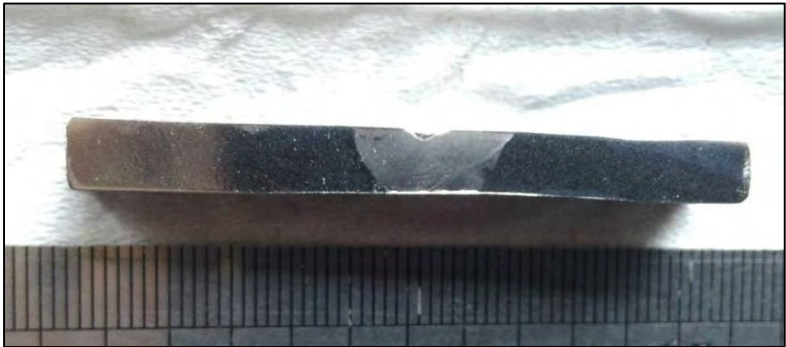
Kegiatan	Februari				maret				April				Mei				Juni			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi literatur																				
Preparasi spesimen																				
Proses pengelasan																				
Pengujian sampel																				
Analisis data																				
Penyusunan Laporan																				
Asistensi Laporan																				

BAB IV

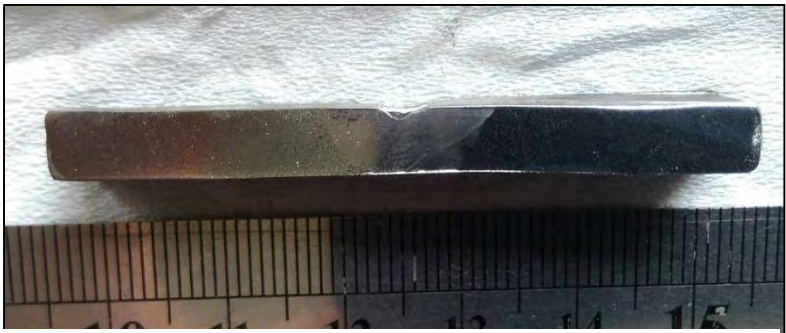
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

IV.1 Hasil Pengujian

IV.1.1 Pengamatan secara makro



Gambar 4. 1 Hasil pengelasan dengan filler CIN-2



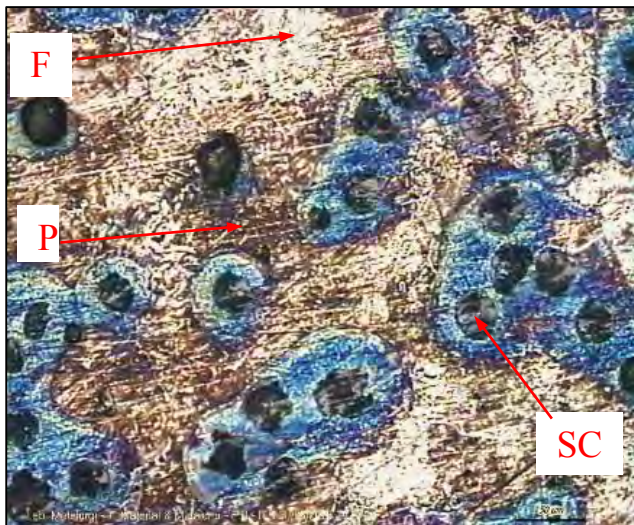
Gambar 4. 2 Hasil pengelasan dengan filler E309Mol-16



IV.1.2 Pengujian Metalografi

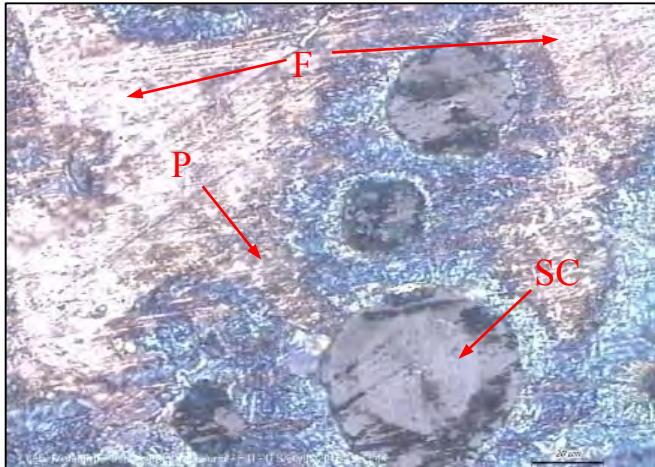
Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui fasa yang terdapat pada material. Pengujian ini mengacu pada ASTM E3. Pengujian struktur mikro ini dilakukan pada material exhaust manifold yang belum diberi perlakuan pada proses repairing dan pada material exhaust manifold yang sudah di repairing. Sehingga dapat diamati apakah material tersebut telah mengalami proses pembentukan yang sesuai dengan standart. Selain itu pengamatan ini juga untuk mengidentifikasi kecurigaan atas keberadaan fasa lain ataupun presipitat. Pengamatan dilakukan dengan perbesaraan 200x dan 500x dengan menggunakan mikroskop optik. Dari foto struktur mikro diperoleh gambar seperti berikut:

a. Original material (tanpa perlakuan)



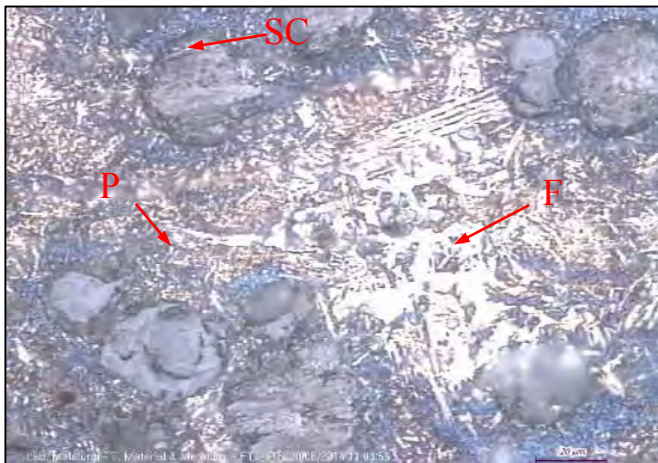
Gambar 4. 3 Struktur mikro base perbesaran 200X.

F, ferrite. P, pearlite, SC, spheroidal carbon



Gambar 4. 4 Struktur mikro base perbesaran 500X. F, ferrite. P, pearlite, SC, spheroidal carbon

b. Base metal setelah perlakuan

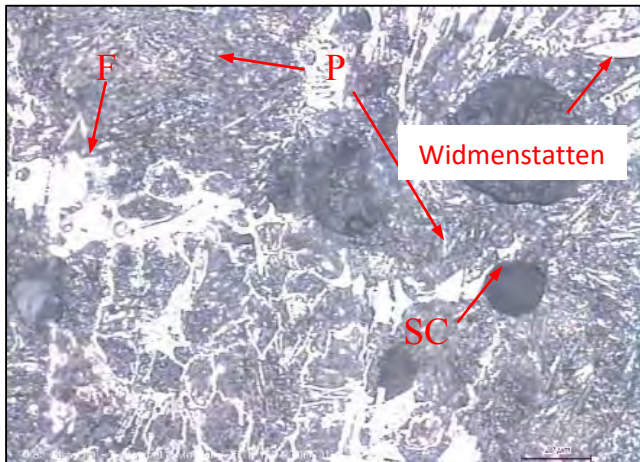


Gambar 4. 5 Struktur mikro pada daerah base metal. Spesimen 1 (ENiFe-CI). P, pearlite. F, ferrite. SC, spheroidal carbon

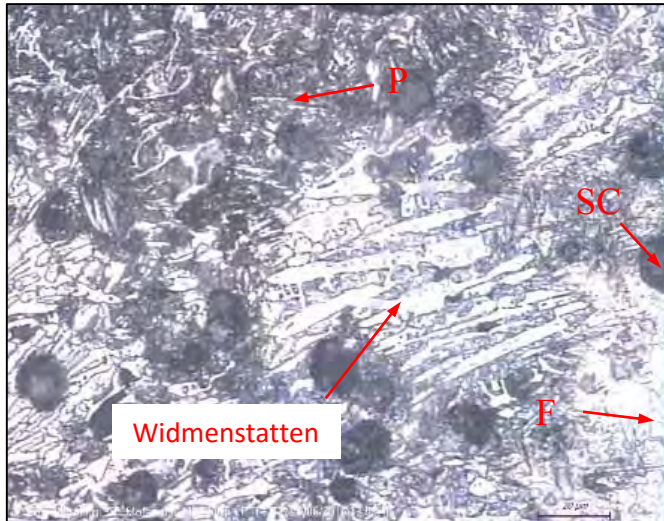


Gambar 4. 6 Struktur mikro pada daerah base metal. Spesimen 2 (E309mol-16). P, pearlite. F, ferrite. SC, spheroidal carbon

c. HAZ



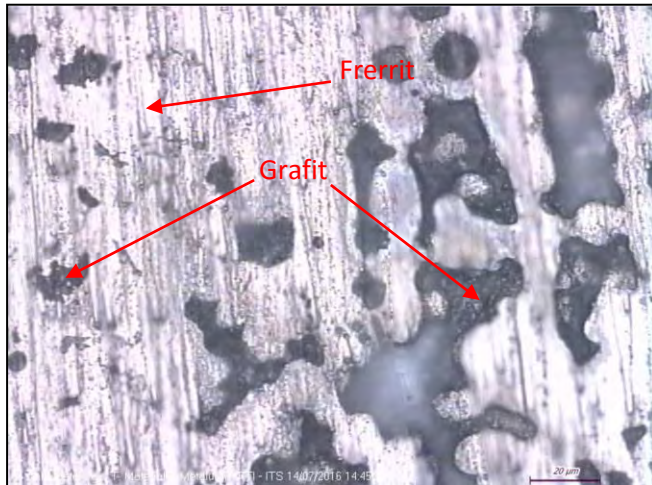
Gambar 4. 7 Struktur mikro pada material exhaust manifold bagian HAZ perbesaran 500X. Spesimen 1 (ENiFe-CI).



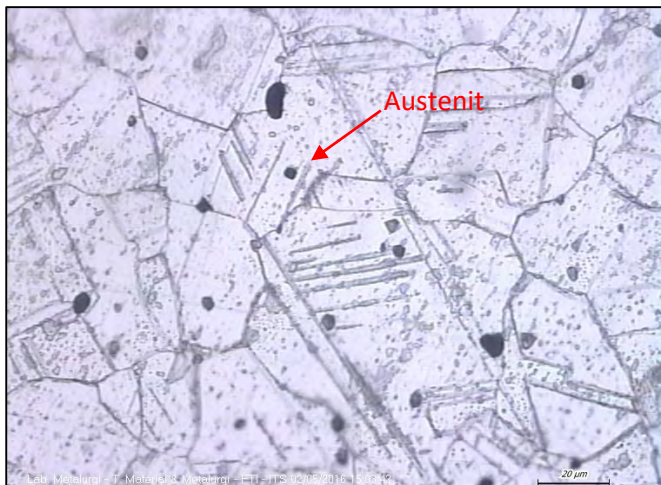
Gambar 4. 8 Struktur mikro pada material exhaust manifold bagian HAZ dengan. Spesimen 2 (E309mol-16). P, pearlite. F, ferrite. SC, spheroidal Carbon.



d. Weld Metal



Gambar 4. 9 Weld metal dengan filler ENiFe-CI

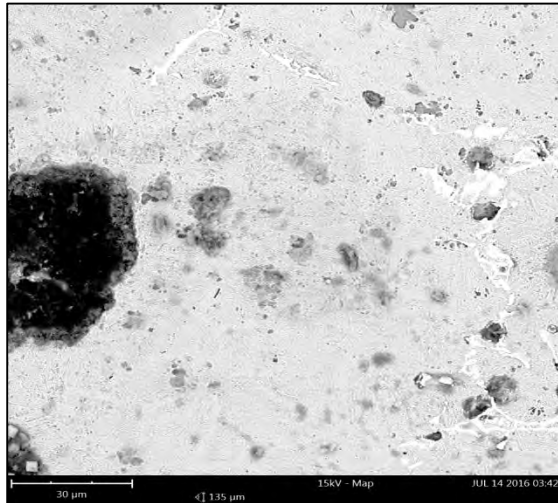


Gambar 4. 10 Weld metal dengan filler E309Mol-16

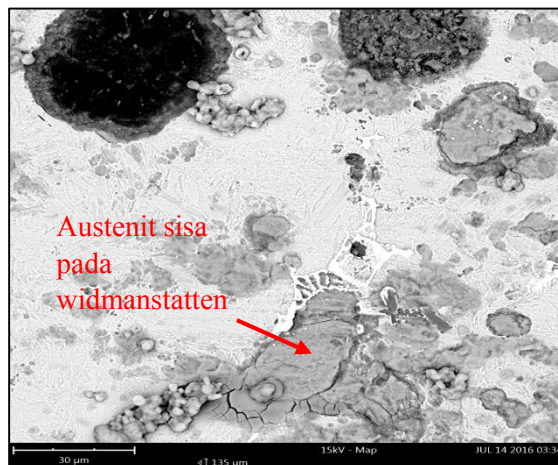


IV.1.3 Uji SEM

a. ENiFe-Cl



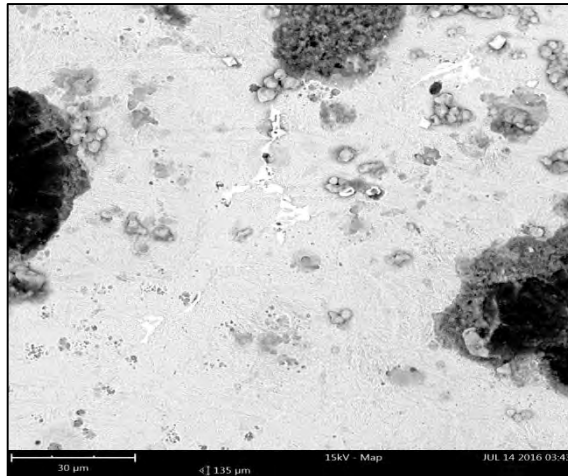
Gambar 4. 11 Hasil SEM pada daerah Base



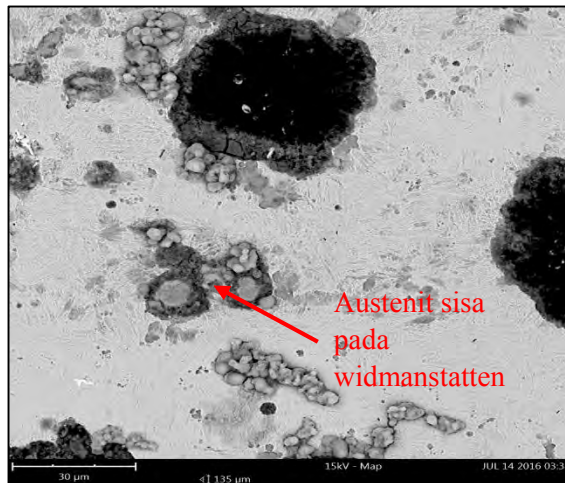
Gambar 4. 12 Hasil SEM pada daerah HAZ



b. E309Mol-16



Gambar 4. 13 Hasil SEM pada daerah Base

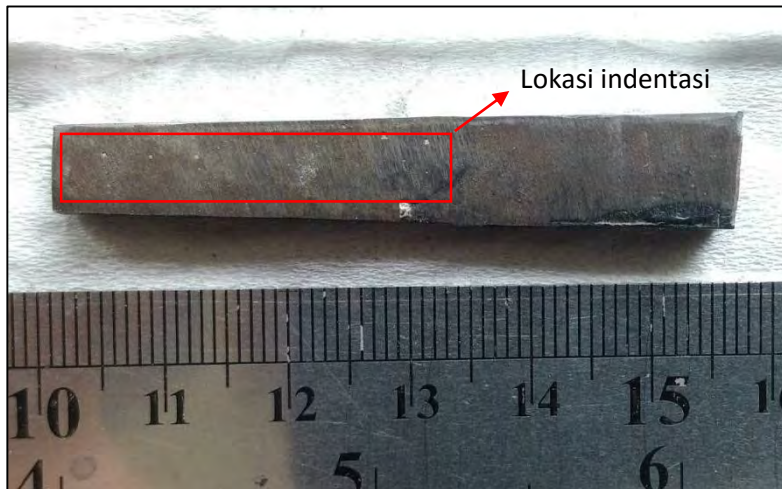


Gambar 4. 14 Hasil SEM pada daerah HAZ



IV.1.4 Uji Hardness

Uji hardness dilakukan menggunakan metode Brinell dan dengan mengacu pada standar ASTM E10. Pengujian ini dilakukan dengan distribusi indentasi di lima titik pada base material dan melintang dari base, HAZ hingga Weld pada logam yang dilas dan diambil nilai rata-ratanya. Data dari pengujian kekerasan ditunjukkan pada tabel IV.1 hingga IV.3 dan distribusi lokasi indentasi ditunjukkan oleh gambar. 4.9 dan 4.10.



Gambar 4. 15 Lokasi indentasi pengujian brinell pada spesimen yang dilas dengan ENiFe-CI



Gambar 4. 16 Lokasi indentasi pengujian brinell pada spesimen yang dilas dengan E309 mol-16

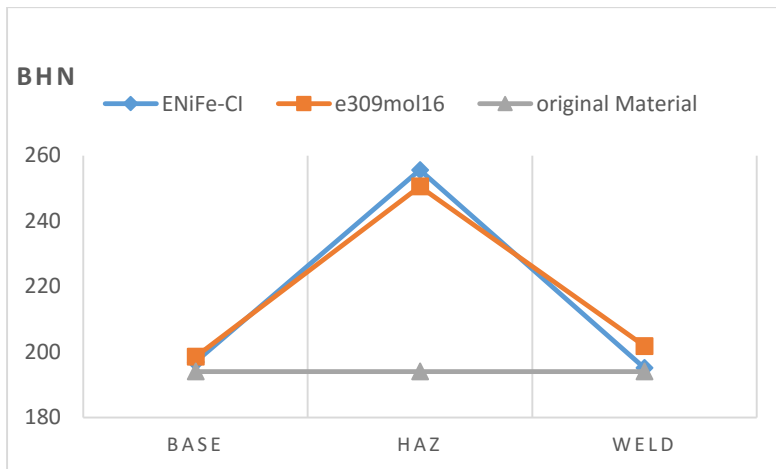
Tabel IV. 1 Data Hardness Material Asli

FCD 600	Nilai (HB)					rata-rata
Original	189.9	195.3	191.7	197.1	196.2	194.04



Tabel IV. 2 Nilai Hardness Rata-rata setelah dilas dengan kedua filler

Area	Rata-rata nilai Hardness (Hb)	
	ENiFe-CI	E309Mol-16
Base	196.92	198.54
HAZ	255.6	250.56
Weld metal	195.12	201.78



Gambar 4. 17 Grafik perbandingan nilai hardness 3 spesimen

Pada gambar 4.17 terlihat hasil sketsa posisi indentasi pada exhaust manifold yang belum mengalami perlakuan dan setelah mengalami perlakuan karena proses pengelasan. Indentasi dilakukan sepanjang logam pada material asli yang belum mengalami perlakuan, sementara pada spesimen yang diberikan perlakuan indentasi dimulai dari daerah yang paling jauh hingga yang paling dekat dengan sumber panas, yaitu base metal, HAZ, dan weld metal. Nilai kekerasan pada material asli ditunjukkan pada tabel IV.1 memiliki rata-rata 194.04HB. Sementara nilai kekerasan pada spesimen pertama yang dilas dengan elektroda CIN-2 ditunjukkan pada Tabel IV.2 dan menunjukkan rata-rata pada area base metal sebesar 196.92HB, sementara pada area HAZ sebesar 255.6HB dan pada weld metal sebesar 195.12HB. Pada exhaust manifold yang dilas dengan menggunakan elektroda E309mol-16 memiliki nilai kekerasan yang ditunjukkan pada Tabel IV.3 dan memiliki rata-rata pada area base metal sebesar 1948.54HB, sementara pada area HAZ sebesar 250.56HB dan pada area weld metal sebesar 201.78HB.



IV.2 Pembahasan

Proses pengelasan pada exhaust manifold yang dibentuk menjadi dua spesimen dilakukan dengan parameter pengelasan yang sama seperti yang tertera pada BAB 3, secara perhitungan menghasilkan Heat input sebesar 1012 J/s, dari hasil perhitungan tersebut didapatkan lebar HAZ sebesar 5.28 mm dan laju pendinginan sebesar 1.0889°C/s. Pemilihan parameter pengelasan memiliki peranan penting dalam proses pengelasan besi cor karena rawan terjadinya blowhole pada proses akhir pengelasan jika Heat input yang diberikan terlalu tinggi, selain itu juga semakin besar Heat input dan temperature pre Heat yang diberikan maka semakin kecil pula laju pendinginannya, hal ini dapat dilihat dari rumus matematis perhitungan laju pendinginan. Parameter yang dipilih mampu mereduksi laju pendinginan tetapi belum cukup baik untuk mempertahankan fasa selama proses pengelasan, hal ini didapatkan dengan membandingkan hasil perhitungan dengan kurva CCT besi cor nodular. Sementara dari hasil pengujian metalografi dengan menggunakan etsa Nital didapatkan struktur berupa spheroidal (nodular) yang diselubungi ferrit dengan matrik pearlit dan ferrit pada material exhaust manifold sebelum perlakuan seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.3 dan 4.4. Terlihat ada beberapa grafit yang tidak berbentuk nodul sempurna, hal ini disebabkan karena kecilnya komposisi magnesium (Mg) dan silikon (Si) sehingga pembentukan grafit menjadi nodul tidak terlalu baik. Dimana kedua unsur ini memiliki peranan penting pada pembentukan nodule, magnesium (Mg) memiliki fungsi yang sangat penting dalam pembentukan grafit nodule pada besi cor nodular yaitu sebagai inisiator pembentukan grafit, kemampuan mampu tarik dan ketahanan terhadap beban impak sangat dipengaruhi oleh pembulatan grafit, dalam hal ini unsur Magnesium (Mg) memiliki peran penting (Widodo, 2007). Selain itu juga Unsur silikon(Si) merupakan unsur yang menyebabkan pengintian untuk membentuk Grafit Nodular berlangsung secara cepat, akibatnya adanya pengintian yang cepat ini maka pertumbuhan butir tidak sempat



berkembang bebas sehingga butir atau struktur mikro menjadi lebih kecil (Athanasius, 2010).

Struktur mikro base metal setelah perlakuan (gambar 4.5 dan 4.6) terlihat bahwasannya pearlit pada matriks lebih banyak daripada sebelum perlakuan, peningkatan persentase jumlah pearlit sesuai perhitungan yaitu sebesar 15.867% pada spesimen yang dilas dengan filler ENiFe-CI dan 13.281% pada spesimen yang dilas dengan filler E309Mol-16. Hal ini disebabkan karena adanya proses perlakuan panas preheat yang mengurangi laju pendinginan pada saat proses pengelasan dan PWHT pada saat setelah dilakukan proses pengelasan dengan tujuan tempering. Temperatur PWHT yang berada pada kisaran temperature rekristalisasi mengakibatkan berubahnya ukuran fasa pearlite menjadi lebih besar dari sebelumnya. Banyaknya fasa pearlite membuat kekerasannya semakin meningkat. Dan Pada struktur mikro pada daerah HAZ (gambar 4.7 dan 4.8) terlihat adanya penambahan luas area pearlite dan terbentuknya widmanstatten selama proses pendinginan yang telah dikendalikan dengan diberikannya pre Heat. Matrik pada daerah HAZ masih tetap sama seperti daerah yang lain yaitu ferrit dan pearlit tetapi ada sedikit perubahan dari fasa ferrit menjadi widmanstatten dimana kekerasannya lebih tinggi daripada ferrit. Hal ini didukung oleh gambar 4.11 dan 4.12 yang menerangkan hasil SEM daerah Base dan HAZ pada material yang dilas dengan filler ENiFe-CI terlihat terbentuknya Austenit sisa pada widmanstatten pada ferrit yang terkonsentrasi pada HAZ. Hal serupa juga ditunjukkan pada hasil SEM pada permukaan base dan HAZ oleh material yang dilas dengan filler E309Mol-16 (gambar 4.13 dan 4.14).

Gambar 4.17 menunjukkan adanya peningkatan nilai kekerasan pada daerah base metal dari yang sebelum dan sesudah diberi perlakuan (tabel IV.1 dan IV.2), hal ini dikarenakan adanya peningkatan jumlah pearlite pada matriksnya seperti yang tertera pada analisa uji metalografi. Sementara pada daerah HAZ nilai kekerasan yang didapat mengalami peningkatan yang signifikan baik pada material yang sudah diberi perlakuan maupun belum, hal



ini terjadi dikarenakan pada daerah HAZ terbentuk fasa pearlite yang lebih banyak daripada daerah yang lainnya pada spesimen uji dan perubahan fasa ferrit menjadi widmanstatten. Dengan persebaran pearlite yang semakin banyak dan adanya widmanstatten maka nilai kekerasan yang ada juga semakin meningkat.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

A. Gambar Preparasi Spesimen



B. Hasil Perhitungan Lebar HAZ dan Laju pendinginan

a. Heat input

Voltage (E)	= 25 V
Ampere (I)	= 75 A
Efesiensi (η)	= 0.9 (SMAW)
Travel speed (v)	= 100mm/min (1.67 mm/s)
Tpreheat	= 300°C

$$H = \frac{E.I.\eta}{v}$$

$$H = \frac{25.75 \cdot 0.9}{1.67}$$

$$H = 1012 \text{ J/s}$$

b. Lebar HAZ

$$HAZ = \frac{1}{T_p - T_o} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot C \cdot t \cdot Y}{H} + \frac{1}{T_m - T_o}$$

$$HAZ = \frac{1}{730 - 300} = \frac{3.14 \cdot 0.0078 \cdot 0.47 \cdot 10 \cdot Y}{1012} + \frac{1}{1250 - 300}$$

$$HAZ = 5.28 \text{ mm}$$

c. Laju Pendinginan

Relative thickness

$$\tau = h \sqrt{\frac{\rho \cdot C \cdot (T_c - T_o)}{H_{nett}}}$$

$$\tau = 10 \sqrt{\frac{(0.0078)(0.47)(250)}{1012}}$$

$$\tau = 0.301, (\text{thin if } < 0.9)$$

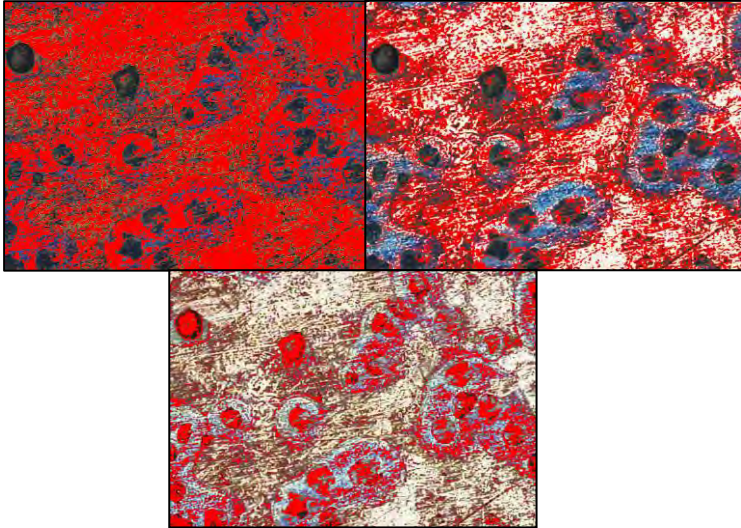
Cooling Rate (R)

$$R = -2\pi K \cdot \rho \cdot C \left(\frac{h}{H_{nett}} \right)^2 (T_c - T_o)^3$$

$$R = -2 (3.14)(0.031)(0.0078)(0.47) \left(\frac{10}{1012} \right)^2 (250)^3$$

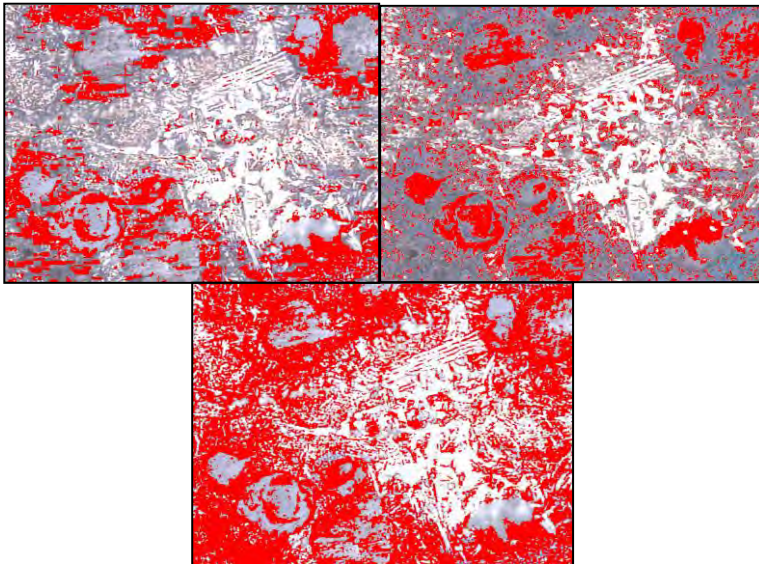
$$R = 1.0889^\circ\text{C/s}$$

C. Perhitngan jumlah Fasa Original

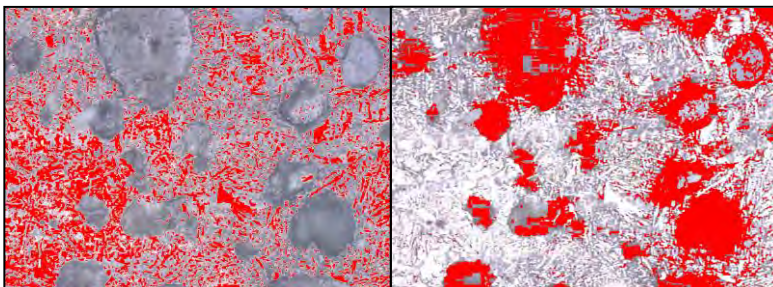


jumlah %			
	pearlit	nodule	ferrite
original	35.536	20.381	54.917

ENiFe-CI



E309Mol-16



base	jumlah %		
	pearlit	nodule	ferrite
ENiFe-CI	51.403	24.357	24.24
E309Mol-16	48.817	28.342	22.841

D. Hasil Uji Hardness

CIN-2

CIN-2	Nilai (HB)					rata-rata
Base	201.6	192.6	198	195.3	197.1	196.92
HAZ	254.7	256.5	258.3	257.4	251.1	255.6
Weld	197.1	192.6	193.5	197.1	195.3	195.12

E309mol-16

E309Mol-16	Nilai (HB)					rata-rata
base	198.9	193.5	203.4	201.6	195.3	198.54
HAZ	246.6	255.6	242.1	260.1	248.4	250.56
Weld	201.6	198.9	204.3	198	206.1	201.78

E. Indentor Hardness Range

TABLE 3 Test Conditions and Recommended Hardness Range

Brinell Hardness Scale	Ball Diameter <i>D</i> mm	Force- Diameter Ratio ^A	Nominal Value of Test Force, F		Recommended Hardness Range HBW
			N	kgf	
HBW 10/3000	10	30	29420	3000	95.5 to 650
HBW 10/1500	10	15	14710	1500	47.7 to 327
HBW 10/1000	10	10	9807	1000	31.8 to 218
HBW 10/500	10	5	4903	500	15.9 to 109
HBW 10/250	10	2.5	2452	250	7.96 to 54.5
HBW 10/125	10	1.25	1226	125	3.98 to 27.2
HBW 10/100	10	1	980.7	100	3.18 to 21.8
HBW 5/750	5	30	7355	750	95.5 to 650
HBW 5/250	5	10	2452	250	31.8 to 218
HBW 5/125	5	5	1226	125	15.9 to 109
HBW 5/62.5	5	2.5	612.9	62.5	7.96 to 54.5
HBW 5/31.25	5	1.25	306.5	31.25	3.98 to 27.2
HBW 5/25	5	1	245.2	25	3.18 to 21.8
HBW 2.5/187.5	2.5	30	1839	187.5	95.5 to 650
HBW 2.5/62.5	2.5	10	612.9	62.5	31.8 to 218
HBW 2.5/31.25	2.5	5	306.5	31.25	15.9 to 109
HBW 2.5/15.625	2.5	2.5	153.2	15.625	7.96 to 54.5
HBW 2.5/7.8125	2.5	1.25	76.61	7.8125	3.98 to 27.2
HBW 2.5/6.25	2.5	1	61.29	6.25	3.18 to 21.8
HBW 1/30	1	30	294.2	30	95.5 to 650
HBW 1/10	1	10	98.07	10	31.8 to 218
HBW 1/5	1	5	49.03	5	15.9 to 109
HBW 1/2.5	1	2.5	24.52	2.5	7.96 to 54.5
HBW 1/1.25	1	1.25	12.26	1.25	3.98 to 27.2
HBW 1/1	1	1	9.807	1	3.18 to 21.8



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan percobaan-percobaan yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan mengenai pengelasan pada FCD600 dengan metode SMAW adalah sebagai berikut:

1. Komposisi kedua filler tidak mempengaruhi struktur mikro base metal dan HAZ. Tetapi spesifikasi teknis kedua filler mengakibatkan luas area pearlite bertambah pada kedua logam dan terbentuk fasa baru pada daerah HAZ akibat panas yang masuk dari proses pengelasan. Sementara weld metal yang dilas dengan ENi-Fe-CI memiliki matriks ferrit dengan grafit dan dengan E309Mol-16 memiliki matriks Austenit.
2. Komposisi kedua filler tidak mempengaruhi morfologi baik pada Base ataupun HAZ, tetapi spesifikasi teknis dari kedua filler mengakibatkan terbentuknya Austenit sisa pada ferrit memunculkan fasa baru berupa widmanstatten di HAZ karena panas yang masuk, terlihat pada hasil SEM.
3. Nilai kekerasan pada material yang dilas dengan kedua filler meningkat karena meningkatnya luas area pearlite pada daerah base metal dan terbentuknya fasa baru pada HAZ, tetapi masih dalam range nilai kekerasan material asli.

V.2 Saran

Berdasarkan hasil dan kesimpulan, terdapat beberapa saran yang dapat digunakan sebagai panduan untuk penelitian selanjutnya:



Laporan Tugas Akhir

1. Pemilihan filler dengan spesifikasi teknis yang lebih baik guna mendapatkan parameter pengelasan yang lebih baik
2. Pemilihan Temperatur Preheat yang lebih tinggi

DAFTAR PUSTAKA

- _____. (1990). Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. Dalam *ASM Handbook, Volume 1*. ASM International.
- _____. (1992). Specification for Stainless Steel Electrodes for Metal Arc Welding. Dalam *AWS A5.4*. Miami: American Welding Society.
- _____. (1999). Standard practice for Microetching Metals and Alloys¹. Dalam ASTM E 407. West Conshohocken: ASTM.
- _____. (2001). Welding Science and Technology. Dalam *AWS Welding Handbook*. Miami: American Welding Society.
- _____. (2006). Specification for Welding Electrodes and Rods for Cast Iron. Dalam *AWS A5.15*. Miami: American Welding Society.
- _____. (2010). Structural Welding Code. Dalam *AWSD1.1*. Miami: American Welding Society.
- Bayuseno, Athanasius P. 2010. *Penambahan Magnesium-Ferrosilikon pada proses pembuatan besi cor grafit bulat: evaluasi terhadap peningkatan sifat mekanik dan impak*. Jakarta: Rotasi
- Callister, William. 2007. *Material Science and Engineering An Introduction*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Charles F.W., 1981. *Iron Castings Handbook*. New York: Iron Castings Society, Inc.

- Davidson, H. James. (2003). *Microstructure of Steels and Cast Irons*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Fang, Z. (2005). *Processes and Mechanism of Welding Residual Stress and Distortion*. Englnand: Woodhad Publishing.
- Funderburk, R. S. (1998). Post Weld Heat Treatment. Dalam R. S. Funderburk, *Welding Innovation*.
- Khan, I. (2007) *Welding Science and Technology*. New Delhi: New Age International.
- Luckyta, K. C. (2012). *Pengaruh PWHT dan non PWHT dengan las SMAW Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Pada Pipa ASTM A-106 Grade B*. Surabaya: Institut Teknologi Seepuluh Nopember.
- Messler, R. (2004). *Principles of Welding*. Weinheim: wiley VCH Verlag GmbH & Co KGaA.
- Musaikan. (1997). *Teknik Las*. Surabaya.
- Radzikowska, Janina M. *Metallography and Microstructures of Cast Iron*. Poland: The Foundry Research Institute
- Sharma, S. D., Saluja, R., & Moeed, K. (2013). A review on Effect of Preheating and/or Post Weld Heat Treatment (PWHT) on Hardened Steel. *International Journal of Research in Mechanical Engineering and Technology*, 216-219.
- Widodo, R. 2007. *Kaji eksperimental pengaruh waktu penahanan cair terhadap pembentukan grafit bulat pada proses pengecoran besi cor Nodular 700*. Jakarta: Jurnal Foundry

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam kesempatan kali ini penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan kepada:

1. Kedua orang tua saya Bapak Mahmud Mursid dan Ibu Wasini yang selalu memberikan dukungan moril dan materil kepada saya.
2. Dr. Agung Puerniawan S.T, M.Eng selaku ketua jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
3. Bapak Ir. Rochman Rochiem M.Sc. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah bersedia memberikan bekal dan pengarahan hingga akhir.
4. Bapak Wikan Jatimurti, S.T, M.Sc. selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan bekal yang bermanfaat.
5. Bapak Alvian Toto Wibisono, S.T, M.T, selaku dosen yang selalu bersedia menjadi teman diskusi.
6. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
7. Bapak Herryan Syahputra S.T. selaku pembimbing di PT. Komatsu Remanufacturing Asia.
8. Teman-teman kontrakan Bahagia 2 no.47, Bram, Erdin, Fadhil, Faris, Yogie, Donny, Angga, dan Arsyad yang selalu menghibur dan menemani penulis selama penyusunan laporan.

Penulis menyadari adanya keterbatasan dan kekurangan dalam penyusunan laporan ini. Besar harapan penulis atas kritik dan saran yang membangun. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Fakhrozi Ahmad Rizky lahir pada 21 April 1994 dari ayah bernama Mahmud Mursid dan ibu Wasini. Penulis merupakan putra keempat dari empat bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Negeri 2 Sei Suka lalu SMP di SMPN 1 Sei Suka, lalu SMA N 1 MATAULI Pandan. Penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember di Jurusan Teknik

Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri. Semasa kuliah penulis aktif di himpunan mahasiswa jurusan teknik material dan metalurgi (HMMT) sebagai staff departemen media dan informasi 2013/2014, kemudia Steering Committee Kaderisasi HMMT selama tiga tahun berturut-turut. Dan staff LDJ Ash Habul Kahfi 2013/2014. Penulis juga emiliki pengalaman kerja praktek di PT. Komatsu Remanufacturing Asia dan ditempatkan di divisi engineering dan mengambil fokus pada seksi pengelasan yaitu Brazing pada cradle pompa dan case pada pompa. Dan sebagai tugas akhir penulis mengambil topic metalurgi manufaktur mengenai pengelasan besi cor nodular.